



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 혼합가스 중에서 GIS 결함별  
부분방전 특성에 관한 연구

A Study on the Partial Discharge Characteristics  
by Defect Types of GIS in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixture Gases



指導教授 吉 璟 碩

2016年 2月

韓國海洋大學校 大學院

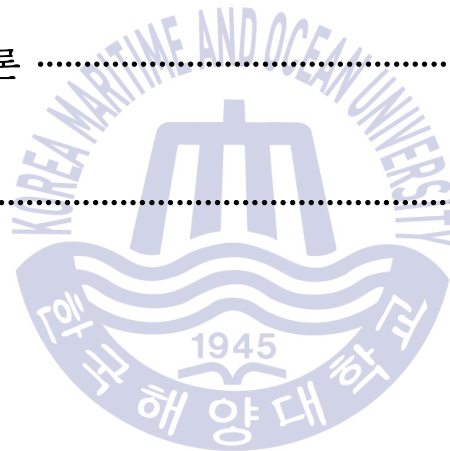
電氣電子工學科

曹 享 恩

## 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	iii
Abstract .....	vii
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구내용 .....	5
제 2 장 이 론 .....	7
2.1 절연 기체 .....	7
2.2 절연열화 및 진단기술 .....	12
2.3 부분방전의 발생 및 검출 .....	18
제 3 장 실험 및 방법 .....	42
3.1 실험계 .....	42
3.2 실험 방법 .....	47
3.3 분석 알고리즘 .....	49

제 4 장    결과 및 분석 .....	53
4.1 교정 실험 .....	53
4.2 결함별 부분방전 특성 분석 .....	55
가. 도전성 이물질 .....	55
나. 도체 돌출 .....	71
다. 외함 돌출 .....	87
4.3 결과 고찰 .....	102
 제 5 장    결    론 .....	 111
참 고 문 헌 .....	113



## 그림 및 표 목차

### <그림 목차>

그림 2.1 가스절연개폐장치 .....	9
그림 2.2 부분방전의 종류 .....	19
그림 2.3 전자사태 과정 .....	21
그림 2.4 교류전압에서 부분방전 발생 패턴 .....	23
그림 2.5 가스절연개폐장치 결함 .....	26
그림 2.6 전기적 검출 .....	28
그림 2.7 직접 검출회로 .....	29
그림 2.8 평형 검출회로 .....	31
그림 2.9 UHF 검출 .....	34
그림 2.10 음향 검출 .....	35
그림 2.11 신호처리 시스템의 구조 .....	36
그림 2.12 부분방전펄스의 파라미터 .....	38
그림 2.13 첨도와 왜도 .....	39
그림 3.1 실험계의 구성 .....	43
그림 3.2 검출저항 .....	44
그림 3.3 전극계 .....	46
그림 3.4 부분방전 분석 알고리즘의 순서도 .....	49
그림 3.5 PRPD 알고리즘 .....	52
그림 4.1 측정파형의 예 .....	54
그림 4.2 교정펄스에 대한 출력전압 .....	54
그림 4.3 방전개시전압 .....	56
그림 4.4 방전소멸전압 .....	56
그림 4.5 최대펄스의 크기(at DIV) .....	58
그림 4.6 평균펄스의 크기(at DIV) .....	58

그림 4.7 위상분포(0.4 MPa) .....	61
그림 4.8 위상분포(0.5 MPa) .....	63
그림 4.9 최대펄스의 크기(at DIV×1.25) .....	64
그림 4.10 평균펄스의 크기(at DIV×1.25) .....	65
그림 4.11 위상분포(0.4 MPa) .....	68
그림 4.12 위상분포(0.5 MPa) .....	70
그림 4.13 방전개시전압 .....	71
그림 4.14 방전소멸전압 .....	72
그림 4.15 최대펄스의 크기(at DIV) .....	74
그림 4.16 평균펄스의 크기(at DIV) .....	74
그림 4.17 위상분포(0.4 MPa) .....	77
그림 4.18 위상분포(0.5 MPa) .....	79
그림 4.19 최대펄스의 크기(at DIV×1.25) .....	80
그림 4.20 평균펄스의 크기(at DIV×1.25) .....	81
그림 4.21 위상분포(0.4 MPa) .....	84
그림 4.22 위상분포(0.5 MPa) .....	86
그림 4.23 방전개시전압 .....	87
그림 4.24 방전소멸전압 .....	88
그림 4.25 최대펄스의 크기(at DIV) .....	89
그림 4.26 평균펄스의 크기(at DIV) .....	90
그림 4.27 위상분포(0.4 MPa) .....	93
그림 4.28 위상분포(0.5 MPa) .....	95
그림 4.29 최대펄스의 크기(at DIV×1.25) .....	96
그림 4.30 평균펄스의 크기(at DIV×1.25) .....	97
그림 4.31 위상분포(0.4 MPa) .....	99
그림 4.32 위상분포(0.5 MPa) .....	100
그림 4.33 이물질의 움직임 .....	103

그림 4.34 방전개시전압 .....	105
그림 4.35 방전소멸전압 .....	106
그림 4.36 최대펄스의 크기(at DIV) .....	107
그림 4.37 최대펄스의 크기(at DIV $\times$ 1.25) .....	107
그림 4.38 평균펄스의 크기(at DIV) .....	108
그림 4.39 평균펄스의 크기(at DIV $\times$ 1.25) .....	108

#### <표 목차>

표 1.1 국가별 온실가스 배출량 .....	2
표 1.2 연도별 온실가스 배출량 .....	3
표 1.3 온실가스 종류별 지구온난화지수 .....	3
표 2.1 SF <sub>6</sub> 의 물리적 특성 .....	8
표 2.2 가스절연개폐장치 등급별 사용압력 .....	10
표 2.3 N <sub>2</sub> 의 물리적 특성 .....	11
표 2.4 가스절연개폐장치의 감시항목과 측정 .....	15
표 2.5 전자파의 특성 .....	33
표 2.6 부분방전펄스의 위상분포 .....	40
표 3.1 가스 혼합비율 .....	47
표 3.2 압력에 따른 분자밀도(공기, 25°C) .....	48
표 4.1 방전개시전압 .....	57
표 4.2 방전소멸전압 .....	57
표 4.3 최대펄스의 크기(at DIV) .....	59
표 4.4 평균펄스의 크기(at DIV) .....	59
표 4.5 극성비(at DIV) .....	63
표 4.6 최대펄스의 크기(at DIV $\times$ 1.25) .....	66

표 4.7 평균펄스의 크기(at DIV $\times$ 1.25) .....	66
표 4.8 극성비(at DIV $\times$ 1.25) .....	70
표 4.9 방전개시전압 .....	73
표 4.10 방전소멸전압 .....	73
표 4.11 최대펄스의 크기(at DIV) .....	75
표 4.12 평균펄스의 크기(at DIV) .....	75
표 4.13 극성비(at DIV) .....	79
표 4.14 최대펄스의 크기(at DIV $\times$ 1.25) .....	82
표 4.15 평균펄스의 크기(at DIV $\times$ 1.25) .....	82
표 4.16 극성비(at DIV $\times$ 1.25) .....	86
표 4.17 방전개시전압 .....	88
표 4.18 방전소멸전압 .....	89
표 4.19 최대펄스의 크기(at DIV) .....	91
표 4.20 평균펄스의 크기(at DIV) .....	91
표 4.21 극성비(at DIV) .....	95
표 4.22 최대펄스의 크기(at DIV $\times$ 1.25) .....	98
표 4.23 평균펄스의 크기(at DIV $\times$ 1.25) .....	98
표 4.24 극성비(at DIV $\times$ 1.25) .....	101
표 4.25 펄스 수(at DIV) .....	109
표 4.26 펄스 수(at DIV $\times$ 1.25) .....	110



# A Study on the Partial Discharge Characteristics by Defect Types of GIS in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixture Gases

*by Hyang-Eun Jo*

Department of Electrical & Electronics Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University  
Busan, Republic of Korea

## Abstract

Since 1960s, SF<sub>6</sub> gas has been significantly used as an insulating medium in power apparatus. It is, however, one of the greenhouse gases and its global warming potential (GWP) is 23,900 times higher than that of CO<sub>2</sub>. For this reason, the use of SF<sub>6</sub> gas is being restricted across the world and studies on substitute gases for reducing SF<sub>6</sub> gas has been in progress. Until now, the insulation performance of mixture gases has been mainly evaluated by breakdown voltages, while studies in aspect of partial discharge (PD) have not been carried out.

This dissertation dealt with the PD characteristics depending on defect types in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixture gases for insulation design and risk

assessment of gas insulated switchgears (GISs). Related parameters such as discharge inception voltage (DIV), discharge extinction voltage (DEV) as well as discharge magnitude ( $q$ ), pulse count ( $n$ ), phase distribution ( $\Phi$ ), and polarity ratio at the DIV and 1.25 times of the DIV were analyzed in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixture gases.

Three electrode systems such as a free particle (FP), a protrusion on conductor (POC), and a protrusion on enclosure (POE) were fabricated to simulate major insulation defects in GISs. PD signal generated by defect was measured according to IEC 60270 at 0.4 MPa and 0.5 MPa. In addition, an algorithm was designed and applied to phase resolved partial discharge (PRPD) analysis.

DIV and  $q$  were higher in the FP than other defects. Parameters were not affected by the ratios of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixture gases since they were dependent on the particle moving. PD pulses were distributed in all of the phases.

In POC, DIV, DEV, as well as maximum and average magnitude of PD pulse decreased as an increase of N<sub>2</sub> ratio. In case of phase distribution, PD pulses over 95% were distributed in the negative half (230°~310°) in pure N<sub>2</sub> but they were distributed in the positive half (40°~130°) as SF<sub>6</sub> ratio was more than 20%. Parameters measured at DIV×1.25 showed that both the maximum and average pulse magnitude increased and PD pulses over 90% were distributed in the positive half (40°~130°) in all ratios.

In POE, each DIV and DEV in N<sub>2</sub> ratio below 50% was the same as those in pure SF<sub>6</sub> and it decreased rapidly when N<sub>2</sub> ratio was over

than 80%. The average pulse magnitude was the highest in pure SF<sub>6</sub> and almost same in other ratios. The similar tendency was observed at 0.4 MPa and 0.5 MPa. As applied voltage increased to DIV×1.25, breakdown occurred in SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50% and SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%. The pulse count increased with the ratio of N<sub>2</sub>. The phase distributions appeared opposite to POC. PD pulses over 95% were distributed in the positive half in pure N<sub>2</sub> and they were distributed in the negative half as ratio of the SF<sub>6</sub> gas increased. However, the phase distributions in POE were not affected by the applied voltage and they appeared identically at DIV×1.25.

DIV of mixture gases, which are related with insulation breakdown was compared with pure SF<sub>6</sub> in three defects. PD in FP was almost incepted at the same voltage without the influence of gas ratio. In POE, DIV in N<sub>2</sub> ratio below 50% were the same as those in SF<sub>6</sub> 100%. However, it decreased rapidly when the N<sub>2</sub> ratio was over than 80% and DIV of N<sub>2</sub> 100% decreased 60%. In POC, DIV decreased with the increase of N<sub>2</sub> ratio. In SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%, SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%, and pure N<sub>2</sub>, DIV decreased 6%, 18%, and 70% comparing with pure SF<sub>6</sub>, respectively.

From the experimental results, although DIV in POC decreased below 6% in SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%, the use of SF<sub>6</sub> could be reduced to maintain insulation performance. Therefore, pure SF<sub>6</sub> could be replaced with SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%. All of the parameters presented in this dissertation can be used in aspect of design, manufacturing and operation of GIS.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

육불화황(Sulphur hexafluoride, SF<sub>6</sub>) 가스는 부정기체(Electronegative gas)로 높은 절연내력과 뛰어난 아크소호능력으로 전력설비의 절연매체로 폭넓게 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. 1966년, 프랑스의 EDF 변전소에서 SF<sub>6</sub>를 절연매체로 하는 가스절연개폐장치가 최초로 사용되었으며, 이는 변전소의 면적 축소, 유지보수 비용 절감 등에 많은 기여를 하였다.

그러나 SF<sub>6</sub>는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs 및 PFCs와 더불어 6대 온실가스 중 하나로 환경문제를 야기하며, 특히 1994년 IPCC(Intergovernmental panel on climate change)에서 지구온난화지수(Global warming potential, GWP)가 가장 높은 가스로 발표되면서 사용량이 규제되고 있다.

우리나라는 1960년대 이후 지속적인 경제발전과 전력계통의 급격한 성장을 이루었다. 특히, 발전설비 용량의 경우 1980년대 11,029 MW에서 1995년에는 35,356 MW가 되었으며, 현재는 약 86,969 MW를 넘어섰다. 전력소비 또한 1990년에 비해 2013년에 무려 5배나 증가하였다<sup>[2]</sup>. 그 결과, 우리나라의 온실가스 배출량은 꾸준히 증가하였고, 2012년 기준으로 UNFCCC(United nations framework convention on climate change)에서 선정한 의무감축국 중 미국, 러시아, 일본, 독일, 캐나다 다음으로 6위를 차지하였다. 표 1.1은 UNFCCC 의무감축국 1위~6위까지 온실가스 배출량을 정리한 것이다<sup>[3]</sup>.

표 1.1 국가별 온실가스 배출량

Table 1.1 Greenhouse gas emissions by countries

(단위 : 백만톤 CO<sub>2</sub>eq.)

순위	국가	1990	2011	2012
1	미국	6,219.5	6,717.0	6,487.8
2	러시아	3,363.3	2,284.3	2,295.0
3	일본	1,234.3	1,306.5	1,343.1
4	독일	1,248.0	928.7	939.1
5	캐나다	590.9	701.2	698.6
6	대한민국	295.5	685.7	688.3

2012년, 러시아와 독일의 온실가스 배출량은 1990년 대비 각각 31.8%, 24.8% 감소한 반면, 미국, 일본 및 캐나다는 각각 4.3%, 8.8% 및 18.2% 증가하였다. 특히 우리나라는 132.9%의 증가로 다른 나라들에 비해 20년간 온실가스 배출 증가율이 가장 높았다. 표 1.2에 “2014 국가 온실가스 인벤토리 보고서(2014 NIR)”에서 발표한 우리나라의 연도별 온실가스 배출량을 정리하였으며<sup>[3]</sup>, 표 1.3에 온실가스별 지구온난화지수를 나타내었다. 온실가스는 화합물이 가지고 있는 구조상의 차이로 열축적 능력이 다르며, 이로 인해 온실효과의 잠재력도 달라진다. 이를 지구온난화지수라고 하며, CO<sub>2</sub>가 지구온난화에 미치는 영향을 기준으로 다른 온실가스가 지구온난화에 기여하는 정도를 나타낸 지표이다. 지구온난화지수의 산출기간은 100년으로, 현재 가스별 온난화 기여도는 2012년 기준으로 CO<sub>2</sub>가 90.9%인 반면 SF<sub>6</sub> 1.1%에 불과하지만, 100년 후 가스 사용량이 동일하다면 대기 중 SF<sub>6</sub>의 농도가 상승하기 때문에 그 기여율은 약 10배 상승할 것으로 본다.

표 1.2 연도별 온실가스 배출량

Table 1.2 Greenhouse gas emissions by years

(단위 : 백만톤 CO<sub>2</sub>eq.)

	'90	'95	'00	'05	'08	'09	'10	'11	'12
CO <sub>2</sub>	252.8	386.1	442.3	494.8	537.1	540.8	594	623.4	625.7
CH <sub>4</sub>	32	29.6	29.3	28.7	28.5	28.2	29.3	29.6	29.8
N <sub>2</sub> O	9.6	14.4	18.3	22.1	12.8	12.7	13.3	13.9	14.2
HFCs	1	5.1	8.4	6.7	6.9	5.8	8.1	7.9	8.7
PFCs	-	-	2.2	2.8	2.8	2	2.3	2.1	2.3
SF <sub>6</sub>	0.2	1.4	2.5	4.9	7.7	8.2	10.3	8.8	7.6
총배출량	295.5	436.6	503.1	559.9	595.7	597.8	657.1	685.7	688.3
증가율[%]	-	7.8	7.0	0.7	2.2	0.4	9.9	4.4	0.4

표 1.3 온실가스 종류별 지구온난화지수

Table 1.3 Global warming potential of greenhouse gases

가스 종류	지구온난화지수
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	21
N <sub>2</sub> O	310
HFCs	1,300
PFCs	7,000
SF <sub>6</sub>	23,900

SF<sub>6</sub>는 우수한 아크소호능력 및 차단성능, 높은 절연내력으로 고압변전소, 특히 가스절연개폐장치(Gas insulated switchgear, GIS)의 절연매체로 많이 사용되고 있다. SF<sub>6</sub>의 절연내력은 1기압에서 공기의 3배 가량 높은

장점으로 소형화가 가능하여 도심지 또는 좁은 지역에 대용량의 전력소비를 요구하는 곳에 많이 사용된다. 그러나 표 1.3에 나타내었듯이 지구온난화지수가 CO<sub>2</sub>의 23,900배로 매우 높기 때문에 전세계적으로 사용량을 제한하고 있다.

이러한 이유로 SF<sub>6</sub>의 대체매질에 대한 연구가 오래전부터 진행되어져 왔으나, SF<sub>6</sub> 가스의 물리·화학적 특성을 완전히 충족시키는 순수기체를 찾지 못했다. 또한 고체절연물의 경우 소형화가 어렵기 때문에 초고압, 대용량 설비에는 적용이 불가능하다. 이에, SF<sub>6</sub>의 사용량을 최소화하는 방향으로 혼합기체에 대한 연구가 많이 수행되고 있으며, 여러 가지 기체 중 N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O 및 Dry air가 많이 사용되어 진다. 이 중에서도 특히 친환경적이면서 가격이 저렴하고 절연특성이 우수한 N<sub>2</sub>가 혼합가스로 각광받고 있다<sup>[4]</sup>.

그러나 대부분 가스 혼합비율에 따른 평등·불평등 전계에서 뇌임펄스와 교류전압에 따른 절연파괴전압(Breakdown voltage)에 관한 연구이며 절연열화에 대한 것은 이루어지지 않고 있다<sup>[5]~[9]</sup>. 파괴전압에 따른 평가는 설계적 측면만을 고려한 것으로, 이는 고전압, 대전류를 이용하므로 전극의 손상 등으로 측정값의 많은 편차와 더 많은 시간이 소요된다. 또한 실제 운용에 있어 가스절연개폐장치의 경우 내부에서 고장이 발생하면 보호범위가 넓기 때문에 고장점을 찾아 공급지장 시간을 최대한 단축하는 것이 중요하다. 부분방전과 관련한 파라미터는 더 낮은 전압으로 실험과 분석이 가능하며, 부분방전 발생 시에 나타나는 부산물을 분석함으로써 결함의 위치 및 원인을 진단하고 고장을 예방할 수 있으나 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 설계적 측면과 운용적 측면은 다르기 때문에 모두 분석되어야 하며, 특히 낮은 전압에서의 열화메커니즘 분석은 향후 절연설계에 이용되어 질 수 있다. 또한 가스 혼합비율에 따라 부분방전 특



성이나 결함에 따른 위험도가 각기 다르게 나타나기 때문에 이는 절연설계 시에 반드시 고려되어야 할 것이다.

## 1.2 연구내용

본 논문에서는 SF<sub>6</sub> 사용량을 감소시키기 위한 연구로 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>의 혼합비에 따른 결함별 부분방전 특성에 대해서 분석하였다. 가스 혼합비율은 총 5가지로, SF<sub>6</sub> 100%, SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%, SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80% 및 N<sub>2</sub> 100%이다. 대상은 SF<sub>6</sub>를 주 절연매체로 사용하는 가스절연개폐장치이며, 주요 결함인 도전성 이물질(Free particle), 도체 돌출(Protrusion on conductor) 및 외함 돌출(Protrusion on enclosure)의 3가지 전극계를 제작하고, IEC 60270에 따른 측정시스템을 구성하였다. 또한 PRPD(Phase resolved partial discharge) 분석을 위해서 알고리즘을 설계하여 적용하였다.

방전이 발생하기 시작할 때의 전압을 방전개시전압(Discharge inception voltage, DIV), 방전이 소멸할 때의 전압을 방전소멸전압(Discharge extinction voltage, DEV)이라고 하며, 이는 결함의 상태와 위치에 따라 결정되므로 절댓값을 가지지 않지만 동일한 결함에서는 가스 혼합비율에 따른 경향은 달라지지 않기 때문에 각각을 측정하였다. 또한 이 때의 펄스 크기, 펄스 수, 위상분포 및 극성비를 분석하였다.

전극계 내부 압력은 결함이 빈번하게 발생하는 단로기 및 접지스위치의 압력인 0.4 MPa와 0.5 MPa로 하였으며, 가스 교체 시에 전극계 내부를 10<sup>-3</sup> torr 상태로 하여 주입함으로써 서로 다른 비율의 가스가 혼합되는 것을 방지하였다.

본 논문에서는 현재까지 혼합가스에서의 절연성능을 절연파괴전압에서 평가해온 것과 달리, 운용적 측면인 부분방전에서의 특성을 분석하였다.



실제 운용 중에 발생 가능한 결함을 반영하였으며, 낮은 전압에서의 열화 메커니즘을 분석함으로써 결함별로 가스 혼합비율에 따른 위험도뿐만 아니라 부분방전 특성이 다르게 나타남을 확인하였다. 측정 결과로부터 모든 결함에서 절연을 유지하면서 어느 정도까지 SF<sub>6</sub>의 사용량을 감소시킬 수 있는지에 대해서 분석하였으며, 결과는 향후 절연설계, 운용 그리고 위험도평가(Risk assessment)에 활용되어 질 수 있을 것으로 기대된다.



## 제 2 장 이 론

### 2.1 절연 기체

기체 내에 절연과괴는 충돌이온화 과정에 의한 것으로, 인가전압이 높고, 전자의 수가 많을 때 발생한다. 몇몇 기체의 경우 자유전자의 부착과정으로 제거되는데, 이러한 기체를 부정기체(Electronegative gas)라고 하며, 절연과괴강도가 매우 크다. 그 예로, SF<sub>6</sub>가 있다<sup>[10]</sup>.

고압기체는 전력설비 절연에 있어 매우 안정적인 매질이다. 질소는 화학적으로 안정적인 특성으로 인하여 고압으로 가장 먼저 사용되었으며, 절연내력은 공기와 동일하다. 그 외에 중요한 절연기체는 CO<sub>2</sub>, CFC(프레온가스)와 SF<sub>6</sub>가 있다. 특히 SF<sub>6</sub>는 다른 기체들에 비해 높은 절연내력과 아크소호능력, 불연성 및 열적으로 안정적인 특성으로 전력설비 절연매질로 많이 사용되고 있다. 그러나 앞서 언급했듯이 SF<sub>6</sub>는 환경문제를 야기시키기 때문에 대체매질에 관한 연구가 진행 중이며 특히 혼합가스에 중점을 두고 있다<sup>[11]</sup>.

#### 가. 육불화황(Sulphur hexafluoride, SF<sub>6</sub>)

차단기, 가스절연개폐장치, 변압기 및 가스절연케이블 등의 절연 매체로 SF<sub>6</sub>가 많이 사용되어지고 있으며, 이는 동일한 조건에서 공기에 비해 매우 높은 절연내력(Dielectric strength)을 가지고 있다.

SF<sub>6</sub>는 안정도가 높은 불활성 기체로 상온에서 무색, 무취, 불연성 및 무독성이다. 또한 화학적·열적으로 안정하며, 공기보다 절연내력이 3배가량 높고, 열전도율이 크며, 1기압에서 -63.0℃의 끓는점을 가진다. 또한 비중과 비열이 각각 공기의 5배, 0.7배로 기체절연 재료로써 우수한 성질을 가

지고 있다. 이러한 SF<sub>6</sub>의 물리적 특성을 표 2.1에 나타내었다<sup>[10]</sup>.

표 2.1 SF<sub>6</sub>의 물리적 특성

Table 2.1 Physical properties of SF<sub>6</sub>

분자량 (Molecular weight)	146.06
녹는점(융점, Melting point)	-50.8 °C
액체밀도(Liquid density at 25°C/50°C)	1.33/1.98 g/ml
기체밀도(Gas density at 1 bar and 20°C)	6.2 g/l
비중(Relative density)	5.0(공기=1)
임계온도(Critical temperature)	45.6 °C
임계압력(Critical pressure)	35.56 bar
임계밀도(Critical density)	0.75 g/ml
끓는점(비점, Boiling point)	-63.0 °C
승화점(Sublimation temperature)	-63.8 °C
비열(Specific heat at 30°C)	0.599 J/g
열전도율(Thermal conductivity)	0.1407 W/m°C
유전율(Dielectric constant)	1~1.07
증기압(Vapor pressure at 20°C)	10.62 bar

SF<sub>6</sub>는 열적 안정성이 매우 뛰어나기 때문에 용매가 없는 상태에서는 500 °C(1기압)까지는 분해되지 않아 화학적으로 안정적이지만 온도가 더 높아지면 여러 가지 부산물을 생성시킨다. 또한 평상시 운전 온도에서는 전력설비에 사용되는 구리, 알루미늄 및 강철 등 어떠한 종류의 금속과도 반응하거나 부식을 유발하지 않는다. 그러나 산소나 수증기의 발생으로 인한 전기적 방전현상이 발생하면 SF<sub>6</sub>는 산화되거나 부산물을 생성시키며 이들은 독소를 포함하여 인체에 유해하며, 금속을 부식시킨다. 그러나 SF<sub>6</sub>가 분해되어 생긴 부산물들은 빠른 속도로 다시 재결합하는 경향이

있다. 그렇기 때문에 가스의 절연내력은 빠르게 회복가능하며, 이러한 특성은 SF<sub>6</sub>의 아크소호능력을 우수하게 만들어 준다.

전기적 방전으로 인한 SF<sub>6</sub> 가스의 부산물은 SF<sub>5</sub>, SF<sub>4</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, SOF<sub>2</sub>, SOF<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, HF, S<sub>2</sub>OF<sub>2</sub>, SF<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, SF<sub>8</sub>, SiF<sub>4</sub> 및 금속불화물(Metal fluorides) 등이 있다. 이는 대부분 아크방전에서 분해되지만 산소와 수분이 함유될 경우 코로나방전에서도 발생되어 질 수 있다. 특히 S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, SOF<sub>4</sub> 및 HF의 경우 유독성으로 각별한 주의가 필요하다.

SF<sub>6</sub>를 절연매체로 하는 대표적인 기기는 그림 2.1에 나타난 가스절연개폐장치로, 금속용기(Enclosure) 내에 모선 및 개폐장치, 변성기 및 피뢰기 등을 내장시키고 SF<sub>6</sub>로 충전, 밀폐하여 절연을 유지시키는 종합 개폐장치이다<sup>[12]</sup>.



출처 : (주) 효성

그림 2.1 가스절연개폐장치

Fig. 2.1 Gas insulated switchgear

이는 1966년 프랑스의 EDF 변전소에 최초로 사용되었으며, 현재는 신뢰성이 요구되는 변전소에 대부분 사용되고 있다. 가스절연개폐장치는 소형화가 가능하여 변전소의 면적을 AIS(Air insulated switchgear) 대비 10~20% 수준으로 축소시킬 수 있으며, 좁은 도심지에 설치가 가능하다. 또한 환경적 영향을 최소화할 수 있으며 우수한 내진성을 가지고 있다. 뿐만 아니라 외함접지와 불활성 가스인 SF<sub>6</sub>를 사용함으로써 안전하고 노이즈를 최소화 할 수 있다. 가스절연개폐장치는 등급별로 다음 표 2.2와 같이 SF<sub>6</sub>를 충전하여 사용한다. 흔히 말하는 가스절연개폐장치의 압력은 차단기(Circuit breaker, CB)의 압력을 일컫는 것이다. 결함은 주로 단로기(Disconnecting switch, DS)와 접지스위치(Earthing switch, ES)에서 발생하기 때문에 DS 및 ES에서의 연구가 필수적이다.

배전용으로 사용되는 75 kV급 가스절연개폐장치는 고체절연물로 대체하고 있으나 초고압용은 소형화 등의 문제로 적용이 불가능하다.

표 2.2 가스절연개폐장치 등급별 사용압력  
Table 2.2 Pressure by GIS class

	75 kV	170 kV	370 kV	800 kV
<b>CB</b>	0.5 MPa	0.6 MPa	0.6 MPa	0.6 MPa
<b>DS/ES</b>	0.35 MPa	0.5 MPa	0.5 MPa	0.4 MPa

#### 나. 질소(Nitrogen, N<sub>2</sub>)

SF<sub>6</sub>와 마찬가지로 불활성 기체로 화학적 안정으로 인해 전력설비의 절연매체로 가장 먼저 사용되었다. N<sub>2</sub>는 건조된 대기 부피의 78.08%를 차지하며, 지구상의 원소 중에서 화합물이 아닌 원소 상태로 존재하는 것 중

에서는 양이 가장 많다. 이는 무색, 무취의 기체로, 화학 반응성이 아주 낮으며, 대표적인 특성을 표 2.3에 나타내었다<sup>[13]</sup>.

표 2.3 N<sub>2</sub>의 물리적 특성

Table 2.3 Physical properties of N<sub>2</sub>

분자량 (Molecular weight)		28.0
녹는점(융점, Melting point)		-210 °C
액체 밀도(Liquid density at boiling point)		0.808 g/cm <sup>3</sup>
기체밀도(Gas density at 1 bar and 0 °C)		1.251 g/l
임계온도(Critical temperature)		-147.2 °C
임계압력(Critical pressure)		33.5 bar
임계밀도(Critical density)		0.311 g/ml
끓는점(비점, Boiling point)		-196 °C
비열(Specific heat)	기체	0.248 kcal/kg °C
	액체	0.493 kcal/kg °C
열전도율(Thermal conductivity)		25.83×10 <sup>-3</sup> W/m °C
증기압(Vapor pressure at 20 °C)		1 bar

## 2.2 절연열화 및 진단기술

### 가. 절연열화기구

대부분의 전력설비는 절연물의 열화에 의해 부분방전이 발생하며 이러한 현상이 지속되면서 사고로 이어진다. 장기간 운전 및 조작으로 인한 주변 환경의 스트레스와 제조, 운반 및 설치과정에서 생긴 결함에 의해 절연열화가 진행되며, 각 설비의 운전 실적이나 사용 환경 및 절연시스템 특성 등의 분석을 통하여 이를 정확하게 파악하는 것이 필요하다.

절연열화는 크게 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 열화로 구분되며, 그 중에서 운전 중 발생하는 전기적 열화가 주요원인이다<sup>[14]~[17]</sup>.

열적 열화는 운전 중에 발생하는 온도상승에 의한 경우가 대부분이며, 외부환경의 영향으로 인하여 설비를 구성하고 있는 절연물에서 온도가 상승하면 휘발성 성분이 손실되어 절연물의 분자가 상호결합 및 산화작용을 일으킨다. 이런 현상은 분자 열화를 야기하는 수분이 열과 압력 등의 영향으로 인하여 가수분해의 진행이 저하되어 절연물을 형성하는 구성요소들의 열화작용을 촉진시켜 사고를 유발한다. 열적 열화는 절연물의 열화뿐만 아니라 장비의 소모현상, 패킹재료 등의 열화를 포함하기 때문에 절연의 수명은 절연에 사용되는 재료뿐만 아니라 절연의 물리적 효과와 절연에 영향을 미치는 요인들에 따라 달라진다. 뿐만 아니라 부분방전의 발생, 기계적 강도의 저하 및 흡습 등 외부의 영향을 받기 쉽게 되어 다른 열화원인에 상당히 많은 영향을 주며, 절연층 내부 및 권선 단말부나 출력케이블의 손상 등으로 나타나기도 한다. 열적 열화에 의한 물리적, 화학적 변화가 생기고, 전기적, 기계적 열화를 야기하여 궁극적으로 절연성능을 저하시킨다.

불평등 전계가 형성될 경우 전극이나 불순물 등의 결함에서 전계가 집중되어 파괴전압이 낮은 기체 또는 액체 중에서 부분파괴가 일어나고 이



들 방전이 고분자를 공격해 열화를 발생시키는데 이러한 현상을 방전열화라고 하며, 전기적 열화가 주요인이다. 전기적 열화는 기기에 인가되는 전계에 기인하는 것으로 전도전류, 유전체손, 전자력/정전력 및 부분방전을 발생시킨다. 가스절연개폐장치의 경우 도전성 파티클, 절연물내 보이드 및 플로팅 금속입자 등의 결함이 존재하며, 이러한 결함에서 주로 부분방전이 발생한다. 부분방전은 하전입자에 의해 절연물 표면에 충격을 주게 되어 분자구조를 흐트러뜨리며, 부분방전에 의해 생성되는  $O_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  등이 산화작용을 일으켜 절연물의 열화를 초래한다.

기계적 열화는 설비의 응력, 진동, 충격, 피로 등의 여러 가지 주위 환경에 의한 열화를 말하며, 대전류에 의한 전자력 발생 등에 의해 정상적 분자구조 상실은 절연물의 기계적 특성을 저하시켜 사고를 유발한다.

환경에 의한 열화는 화학약품, 기름, 먼지에 의한 오손 및 습기에 의한 것이다. 아크에 의해 분해된  $SF_6$ 가 재결합하는 과정에서 수분과 반응하여 생성된 분해가스는 절연물 표면에 부착될 경우 절연물의 절연 저항을 감소시키며, 특히 오래된 절연물의 균열된 곳이나 구멍에 침투하여 낮은 저항경로를 만들어 누설전류와 절연파괴를 야기하는 잠재요인으로 작용한다. 가스절연개폐장치의 설치 환경에 따라, 산과 알칼리성의 화학물질과 주변 환경에서 유출된 기름은 장치의 절연 내부표면을 덮는 경우와 주변의 수분을 포함하는 오물과 먼지가 열 분산 능력을 감소시키고 절연저항을 낮추어 열적 열화를 발생시키며, 최종적으로 절연파괴를 야기한다. 또한, 제어회로 접점에서의 부식이나 장치표면의 도료를 열화시켜 장치기능에 지장을 주는 경우도 있다. 따라서, 장비의 수명은 절연 구조의 내부에서 산소, 수분, 먼지 등의 화학 물질의 정도에 의존하게 되며, 절연물이 오염된 대기로부터 장비를 보호하여 열화를 방지시켜야한다.

이러한 열화는 단독으로 작용하기보다는 복합되어 작용하는 경우가 많



기 때문에 복합적인 열화특성을 검토할 필요가 있다. 또한 절연열화의 발생 및 진전기구를 명확하게 파악하기 위해서는 각각의 기기별로 운전 실적이나 사용 환경 및 절연시스템의 특성 등을 검토하여야 한다.

#### 나. 진단기술

전력설비 중 개폐장치는 선로의 분기와 연계로 구성이 복잡한 부하설비에서 계통을 구성, 분리 및 변경을 목적으로 사용된다. 그 중에서도 높은 절연성을 갖는 가스절연개폐장치는 모선과 개폐기의 축소화로 변전설비 전체를 콤팩트화할 수 있으며, 고신뢰성 및 안정성 등의 장점으로 많이 사용되고 있으나 단위설비 당 공급전력이 크기 때문에 고장이 발생하게 되면 정전범위가 넓고 전력계통에 악영향을 초래하게 되므로 각종 이상상태를 감시하는 것이 매우 중요하다.

과거에서 현재에 이르기까지 전력설비의 절연 진단기술은 많은 발전을 거듭해 왔다<sup>[18]</sup>. 전력설비의 용량이 크지 않았던 초장기에는 진단이라는 개념이 없었고, 노후정도나 열화상태를 고려하지 않는 고장 후 정비하는 RTF(Run-to-failure) 방식이었다. 전력설비가 대용량화되고 고신뢰성에 대한 인식이 커지면서 이러한 방식은 인적·물적 손실 등 여러 가지 문제점을 발생시켰다. 이러한 이유로 채택되었던 것이 TBM(Time-based maintenance)으로 열화와 노후정도를 고려하여 부품마다 운전 시간 등에 따른 주기를 정해놓고 일정 기간이 지나면 교체하는 방식이었다. 이것으로 인해 설비의 사고가 상당히 많이 감소되었고, 그에 따른 손실 역시 줄일 수 있었다. 그러나 결함이 없는 부품의 교체로 인한 경제적 손실뿐만 아니라 불필요한 점검으로 인한 설비의 해체로 또 다른 사고를 유발하게 되었다. 이러한 문제점들을 보완하고 설비의 효율적인 운전을 위해 국·내외적으로 많은 연구가 수행되어져 왔으며 현재는 상태기반의 유지

보수 방식인 CBM(Condition-based maintenance)에 의한 다양한 진단법이 개발 및 상용화되었다. 이것은 TBM 방식의 연장으로, 설비의 상태를 실시간으로 감시할 수 있다. 설비의 운전 이력 및 경향을 분석하여 유지·보수를 할 수 있기 때문에 경제적이며 장비의 효율적인 운전이 가능하다. 앞으로는 CBM 방식을 바탕으로 한 신뢰성 기반의 유지보수법인 RCM (Reliability-centered maintenance)이 도입될 것이다. 이는 전체 시스템 및 각 부품별 상태, 위험도, 고장이력 및 수명주기비용(Life cycle cost)까지 통합적으로 진단 가능한 방식으로 설비의 안정성 및 유용성을 최대화 시킬 수 있을 것이다.

고장 발생 전에 나타나는 이상 징후, 즉 전조현상(前兆現象)을 감지하고 분석함으로써 효과적인 진단이 가능하다. 예를 들어, 운전 중 진동에 인하여 나사풀림 등의 접촉불량에 기인하여 부분방전 → 절연저하 → 절연파괴에 이르는 과정에서 소리, 진동 및 분해가 등이 부수적으로 발생한다. 이러한 이상상태는 경미한 단계에서 검지하는 것이 바람직하다. 표 2.4는 가스절연개폐장치에서 나타나는 이상상태 및 진단기술을 절연성능, 통전성능 및 기계적 성능으로 나누어 정리한 것이다<sup>[18]</sup>.

표 2.4 가스절연개폐장치의 감시항목과 측정  
Table 2.4 Monitoring list and measurement for GIS

항목	현상	측정장치	상시	점검시		이상 시
				활선	정지	
절연성능	내부 부분방전	코로나 검출기	△	○		○
	이상음(파)	초음파센서 (금속이물검출)		○		○
	가스압 저하	밀도스위치	○	○	○	○
		가스리크 검출기	△	○	○	○
	가스 중 수분증가	수분계		○	○	○



하는 방법으로 X선진단법이 있다.

개폐기는 통상 정지되어 있기 때문에 이상검출이 어려운 반면, 장애발생률이 높기 때문에 중요한 진단 항목 중에 하나가 개폐 성능진단이다. 개폐기기의 동작시간을 측정하여 이상을 판단하며, 정기 점검시 가스 중의 동작부분에 대하여 윤활불량, 변형파괴, 나사풀림 등의 이상을 추정할 수 있다. 운전 중인 경우에는 주접점과 보조접점의 개폐시간을 측정하여 대신할 수 있다.



## 2.3 부분방전의 발생 및 검출

### 가. 부분방전의 발생

1777년, G. Ch. Lichtenberg에 의해 부분방전에 대한 연구가 시작되었으며, 이미 100년 전부터 전력기기나 송전계통에서의 방전은 절연열화에 있어 위험한 요인으로 인식되어 왔다. 과거에는 “코로나 방전(Corona discharge)”으로 불리다가 1900년대 “부분방전(Partial discharge, PD)”으로 용어가 규격화되었다.

부분방전 시험은 전력케이블의 절연열화시험으로 가장 먼저 시행되었으며, 점차 변압기에도 적용되었다. 또한 1970년 이후부터 현재까지 가스절연개폐장치에도 부분방전 시험이 채택되고 있으며, 이 시기에 아날로그 측정법에서 디지털 측정법으로 대체되었고, 몇 년 후에는 신호처리 및 수집 등 모든 것이 컴퓨터화되었다<sup>[19]</sup>.

IEC 60270에서 부분방전은 “절연물 내부 또는 표면에 국부적인 전계 집중으로 인하여 발생하며, 일반적으로 방전은 펄스형태이며  $1\mu\text{s}$ 보다 짧게 나타난다.” 라고 정의된다. 부분방전이 발생했을 경우 대부분 소리, 빛 열 및 화학적 반응 등을 수반하며, 그림 2.2와 같이 내부방전, 연면방전 및 코로나방전으로 분류할 수 있다<sup>[20]</sup>.

연면방전(Surface discharge)의 경우 그림 2.2의 등가회로와 같이 전극의 정전용량  $C_c$ 와 절연물을 통한 정전용량  $C_b$ , 그리고 절연물의 정전용량  $C_a$ 로 표현된다. 이는 부적절한 절연설계에 의한 누설거리 부족 또는 절연물의 표면오손에 기인한 유효 누설거리 감소로 발생하며, 초기에는 절연 성능에 많은 영향을 미치지 않는다. 그러나 연면방전에 의해 발생하는 고주파 전압이 교류전압에 중첩되어 과도한 전기적 스트레스를 가하게 되어 절연물에 손상을 준다. 또한 장기간 지속되면 절연물 표면의 결함부위에 열화가 집중되고 침식이나 부식이 발생되므로 절연물이 전기적·기계적

성능을 저하시킨다. 열화가 더욱 진행되면 연면방전으로 인한 발열과 오손이 촉진되고 탄화도전로가 형성되어 절연파괴로 진전되기도 한다<sup>[19]</sup>. 연면방전에 의한 절연파괴는 전원용량의 차이에 따라 다르지만 일반적으로 글로우 방전 형식으로 이루어지며 아크방전으로 진전하기도 한다. 이러한 경우 열에 의하여 절연재료가 심각하게 손상된다.

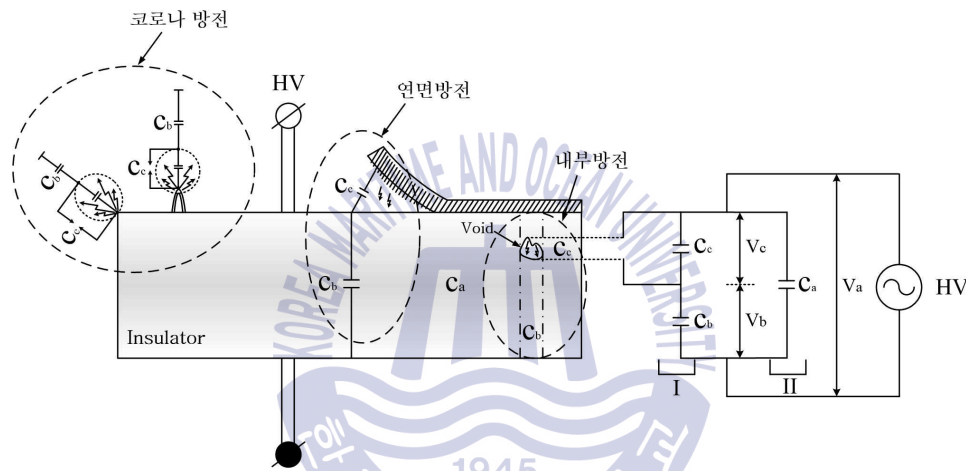
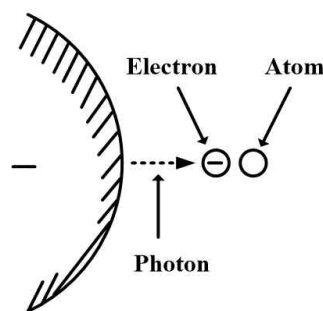


그림 2.2 부분방전의 종류  
Fig. 2.2 Types of partial discharges

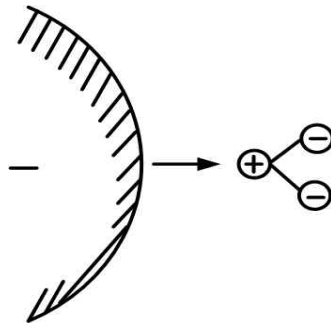
내부방전의 I 영역은 절연물에 보이드가 존재하는 부분이며, II 영역은 절연물 전체이다. 보이드의 정전용량은  $C_c$ 이며  $C_b$ 는 보이드와 직렬로 접속되는 표유정전용량(Stray capacitance),  $C_a$ 는 절연물의 정전용량을 나타낸 것이다. 절연물에 보이드 또는 결함이 존재는 경우 운전전압이 인가되면  $C_c$ 에 전계가 집중적으로 가해지고 공기의 절연내력 이상이 되면 보이드 내부에서는 불꽃방전 형태로 부분방전이 발생한다. 절연물의 내부방전(Internal discharge)은 보이드(Void)와 전기트리(Electrical treeing)로 나눌 수 있다. 보이드 방전이 진전되면 절연물 내부에 수지상의 전기트리가

발생하고 최종적으로 절연파괴에 이르게 되므로 절연물 내부에는 보이드가 존재하지 않아야 한다. 그러나 미세한 보이드가 완전히 제거되지 못하더라도 초기에는 절연물에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 전력설비의 설치위치나 운전상태에 따라 전기적, 열적, 기계적, 환경적 스트레스로 인하여 열화가 진행되면 보이드의 크기가 커질 뿐만 아니라 다수의 보이드가 생성된다. 보이드의 발생은 절연물의 절연성능을 상당히 저하시키고, 결과적으로 기기의 수명까지 저하시키게 된다. 절연물 내부에 보이드가 존재하는 경우, 보이드 내부의 유전율이 절연물의 유전율에 비하여 작으므로 전계가 집중되고, 기체의 절연내력이 고체에 비하여 상당히 낮으므로 보이드 내부에서 기체방전이 발생하게 된다. 이러한 기체방전에 의해 보이드는 열적, 화학적 열화가 촉진되고, 그 크기가 점차 증가하고 결국 고체절연물의 유효 절연성능이 점차 감소하게 된다.

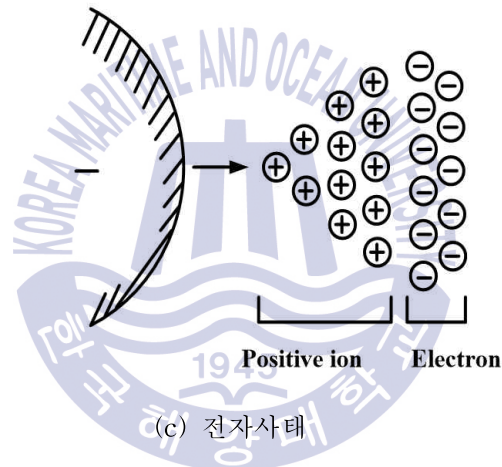
대기 중에서 방전은 자유전자가 전계에 의해 가속되면서 시작된다. 전계에 의해 충분한 에너지를 얻은 전자들이 원자들과 충돌해서 이온(Ion)을 생성시키며, 이러한 과정은 그림 2.3과 같이 양이온들에 의해 전극에서 전자들을 공급해 방전이 지속적으로 이루어질 때까지 전자의 수는 계속 증가한다. 이때 초기전자는 광전리에 의해 생성된다<sup>[21]~[23]</sup>.



(a) 개시



(b) 전자쌍 형성



(c) 전자사태

그림 2.3 전자사태 과정

Fig. 2.3 Process of an electron avalanche

전계에 의해 전자들이 기체를 통과할 때 기본적인 이온화 과정은 식 (2.1)과 같이 나타낸다.



여기서,  $A$ 는 원자,  $A^+$ 는 양이온,  $e$ 는 전자이다.



식 (2.1)과 같이 중성원자에 어떤 전자가 충돌하면 양이온과 전자가 생기고, 이때 전자들은 각각 두 개 이상의 전자들을 생성시킨다. 이러한 과정이 연쇄적으로 일어나 전자들의 양이 급속하게 증가하는 것을 전자사태(Electron avalanche)라고 하며, 이 때의 방전전류는 식 (2.2)와 같다.

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.2)$$

여기서  $d$ 는 갭(Gap) 간격이며,  $\alpha$ 는 Townsend의 1차 이온화 계수로 일정한 전계에서 하나의 전자가 1cm의 거리를 이동할 때 생성된 전자의 수를 나타낸다. 이상의 과정을 거치면서 전자들의 양이 급속히 증가하는 이온화 과정을 1차 과정(Primary process)이라 하고, 양이온과 광자들이 전극을 강타해 전자들이 방출되는 과정은 2차 과정(Secondary process)이라고 한다. 이러한 과정을 거쳐 방출된 전자들은 전극의 극성에 따라 전극에 흡수되거나 중성원자에 부착하여 음이온을 형성한다. 이후 이온들이 모두 소멸할 때까지 전계의 세기는 이온의 영향을 받는다. 이러한 과정은 국부적으로 전계가 집중되면 반복적으로 나타난다. 이와 같이 전계가 집중된 부분에서만 절연파괴가 일어나고 다른 부분에서는 절연이 파괴되지 않는 상태로 남게 되는 현상을 국부방전 또는 코로나방전(Corona discharge)이라고 한다. 전계의 세기는 전선 표면상태에 따라 달라지는데 물방울이나 먼지 등이 부착된 부분에서 보다 집중되며, 전선의 경년 정도에 따라서도 크게 차이 난다. 전계가 집중되는 부분에서의 코로나는 식 (2.3)의 임계전계치  $E_0$  이상이 되면 본격적으로 시작한다.

$$E_0 = 30 \delta M \quad (2.3)$$

여기서,  $E_o$  : 코로나 방전개시 전계강도, [ $\text{kV}_{\text{peak}}/\text{cm}$ ]

$\delta = 2.94 P / (273 + \theta)$ : 상대공기밀도

$P$  : 기압, [ $\text{kPa}$ ]

$\theta$  : 온도, [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$M$  : 도체표면상태계수 ( $\approx 0.5$ )

이다. 이러한 코로나방전은 전력기기 외부의 충전부나 축전 금구류 등에서 발생하는 것으로 부분방전 펄스와는 구분되어야 하는데, 많은 경우 구분이 쉽지 않기 때문에 부분방전 펄스로 오인하는 경우가 발생한다<sup>[24]</sup>.

그림 2.4는 일반적으로 알려진 부분방전 펄스의 형태를 나타낸 것으로 인가전압이 상승하는 부분에서 일정 시점에 도달할 때 방전펄스가 발생되며 전압이 감소하면 사라지는 형태를 가지게 된다.

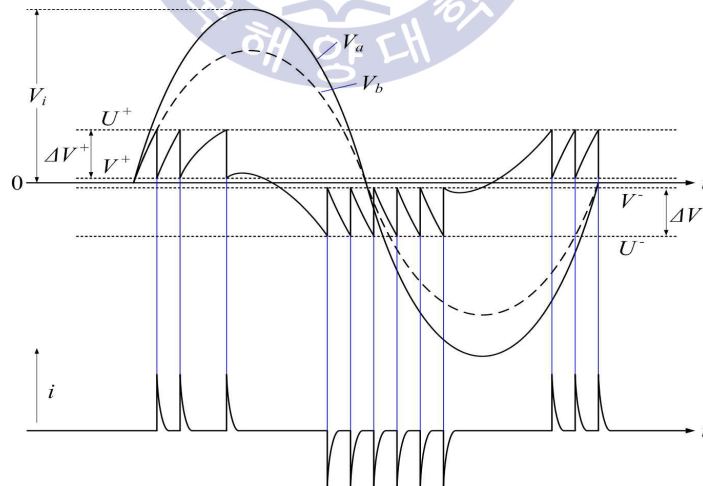


그림 2.4 교류전압에서 부분방전 발생 패턴

Fig. 2.4 Typical PD patterns under AC voltage

운전전압이 서서히 증가하면 전압  $U$ 의 범위에서 보이드 내에 방전이 발생하고, 다시 감소하는 시점에서 인가전압이  $V$ 이하로 되면 방전이 소멸한다. 이와 같이 방전이 발생하는 전압  $U$ 를 보이드 내 방전개시전압 (Discharge inception voltage, DIV)이라 하고, 방전이 소멸되는 시점의 전압  $V$ 를 방전소멸전압(Discharge extinction voltage, DEV)이라고 한다<sup>[20]</sup>. 그림 2.4와 같은 방전 파형에서 보이드 내부에 발생하는 방전전하량  $q_i$ 은 식 (2.4)와 같이 표현된다.

$$q_i \simeq (b+c)\Delta V \quad (2.4)$$

여기서  $\Delta V = U - V$ 로 보이드 내부에서 발생하는 전압강하분이다. 측정이 불가능한  $q_i$ 은 보이드와 직렬로 접속되는 절연물을 이용하여 겉보기 전하량을 측정하여 구할 수 있다. 이때 겉보기 전하량  $q$ 는

$$q = b\Delta V \quad (2.5)$$

와 같이 표현할 수 있다. 방전 전하량  $q$ 가 존재하고, 실제 시료에서의 전압강하는  $(b\Delta V) / (a + b)$  일 때, 방전 에너지는

$$P = \frac{1}{2}c(U^2 - V^2) = \frac{1}{2}c \times \Delta V \times (U + V) \quad (2.6)$$

가 되는데, 여기서  $V$ 는  $U$ 에 비하여 약 10 % 정도로 작다면 식 (2.6)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2}c \times \Delta V \times U \quad (2.7)$$

그리고 방전개시전압은  $U = \frac{b}{(b+c)} V_i$  와 같이 표현되는데 여기서,  $V_i$  는 시료에서 방전이 발생하는 외부 방전개시전압이다. 그러므로 식 (2.7)은 다시 식 (2.8)과 같이 정리할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2}c \times \Delta V \times \frac{b}{(b+c)} V_i \quad (2.8)$$

식 (2.8)에서  $b$ 는  $c$ 에 비교하면 무시될 수 있는 값이므로

$$P = \frac{1}{2}b \Delta V V_i = \frac{1}{2}q V_i \quad (2.9)$$

로 나타낼 수 있다.

부분방전 파형은 정극성 및 부극성 펄스에 대하여 다양한 형태로 발생하게 된다. 특히 결함의 위치, 전극의 형상 및 절연재료 등에 따라 방전 펄스는 고유의 특성을 갖는다.

#### 나. 가스절연개폐장치의 결함

가스절연개폐장치는 제조, 조립 및 운반과정에서의 부주의로 여러 가지 결함이 발생한다. 대부분 현장에서 검출되는 것이 일반적이나 그렇지 못할 경우 절연성능 저하 및 사고로 이어질 수 있기 때문에 발생초기에 검출하는 것이 매우 중요하다. 또한 결함마다 방전특성 및 위험도가 다르기

때문에 이를 분석함으로써 효율적인 진단이 가능하다. 가스절연개폐장치에서 발생한 가능한 결함은 다음과 같다<sup>[19]</sup>.

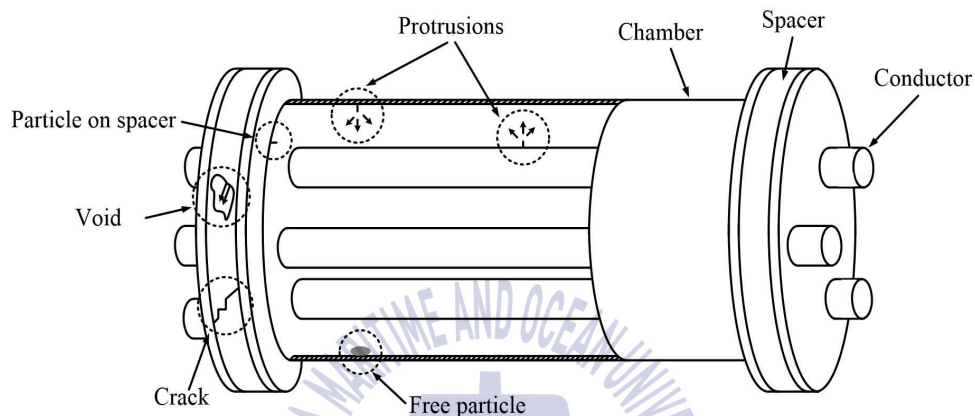


그림 2.5 가스절연개폐장치 결함

Fig. 2.5 Defects in GIS

#### ① 도전성 이물질(Free particle)

가스절연개폐장치에서 발생하는 결함 중 50% 이상을 차지하는 가장 주된 원인으로, 조립이나 운반시 도전성 이물질이 가스절연개폐장치 내부로 혼입되어 발생한다. 파티클이 외함 주위를 움직이거나 HV 도체로 부착되어 고장을 일으키기도 한다. 파티클의 크기, 무게 및 재질 등에 영향을 받으며 상용주파전압에 매우 취약하다.

#### ② 도체 돌출(Protrusion on conductor)

돌출부 결함 중 하나로 가스절연개폐장치 내부 도체에 스크레치나 혼입된 파티클이 부착되어 발생한다. 돌출부의 형상은 인가전압에 의해

시간이 지남에 따라 뽕족한 것에서 둥글게 변할 수 있으며, 이러한 결함은 방전개시전압과 고장레벨(Breakdown level)을 낮출 수 있다. 결함은 부분방전 신호가 배경잡음만큼 작아 측정이 어렵다.

#### ③ 외함 돌출(Protrusion on enclosure)

도체 돌출과 마찬가지로 돌출부 결함의 한 종류로, 외함에 생성된 스크레치나 혼입된 파티클에 의해 발생한다. 도체 돌출과 발생 위치 차이로 인하여 부분방전 특성이 반대로 나타난다.

#### ④ 고체 절연물(Insulation)

고체 절연물의 결함은 표면에 존재하는 것과 내부에 존재하는 것으로 나누어진다. 표면결함은 도전성 이물질이 이동하다가 절연물 표면에 부착된 경우(Particle on spacer)로 과도급준파전압과 뇌임펄스전압에 매우 취약하다. 내부결함은 섬락에 의한 트래킹(Crack)과 노후화된 설비에서 종종 나타나는 절연물 내 공극(Void)이 있다.

#### ⑤ 부유전극(Floating)

불완전한 체결로 인하여 운전 중 가스절연개체장치가 진동하면서 접점이 떨어지게 되어 생기는 결함이다. 도전성 이물질 다음으로 많이 발생하며 이러한 결함은 단시간에 고장을 이어지지 않는다. 기계적 진동으로 인하여 음향신호가 발생하기 때문에 음향 검출법(Acoustic method)으로 쉽게 측정이 가능하다.

이러한 결함이 존재하면 전계가 집중되고 절연내력이 상대적으로 약화되어 결함부분에서 부분방전이 발생하며 지속될 경우 절연성능이 더

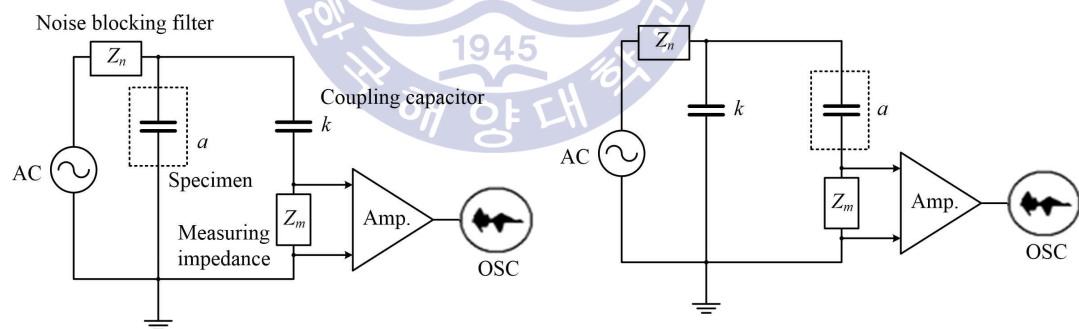
욱 악화되어 결과적으로 절연파괴를 초래하게 된다.

#### 다. 부분방전의 검출

부분방전에 의해 방전펄스, 소리, 전자파, 빛, 열, 진동 및 화학적 부산물이 발생하며, 이러한 현상들을 분석함으로써 부분방전의 검출이 가능하다. 앞서 언급한바와 같이 부분방전 측정법은 전기적 검출법, 기계적 검출법과 같이 직접 측정하는 방법, 부분방전에 의해 발생하는 SF<sub>6</sub>의 분해생성물을 측정하거나 방전시 발생하는 전자파를 측정하는 간접적인 방법이 있다<sup>[17]</sup>.

##### ① 전기적 검출(Electrical detection)

IEC 60270에 의거한 가장 일반적인 부분방전 측정법이며 설비 점검 시에 가장 많이 이용되며 기본회로는 그림 2.6과 같다.



(a) 검출임피던스-결합콘덴서 직렬

(b) 검출임피던스-시료 직렬

그림 2.6 전기적 검출

Fig. 2.6 Electrical detection

부분방전은 전류펄스형태로 나타나고 결합콘덴서와 검출임피던스를 이용하여 측정되어진다. 검출임피던스의 접속위치는 (a)와 같이 결합콘덴서 k와 직렬 또는 (b)에 나타낸 것과 같이 시료 a와 직렬이 될 수 있다. 실제

적용에서는 결합콘덴서와 직렬로 검출임피던스를 접속하는 (a)가 사용되는데 이는 시료에서 큰 방전이 발생할 경우 측정 장치에 과도전류가 흘러서 회로를 소손시킬 수 있기 때문이다. 측정 장치는 고전압 발생원, 노이즈 제거 필터(Noise blocking filter,  $Z_n$ ), 결합콘덴서(Coupling capacitor,  $k$ ), 검출임피던스(Measuring impedance,  $Z_m$ ) 및 증폭기(Amp.) 등으로 구성된다. 결합콘덴서에서 부분방전이 발생하면 시료의 부분방전 신호와 구분이 곤란하므로 정확한 측정을 위해서 고전압 발생원과 결합콘덴서는 시험전압 내에서는 내부방전이 발생하지 않아야 한다. 또한 고전압 발생원과 시료사이에는 외부로부터 전도성 잡음이 유입되거나 부분방전에 의한 펄스가 전원으로 유출되는 것을 방지하기 위해 저항 및 인덕턴스를 이용하여 폐회로를 구성하여야 한다. 실제 사용에 있어 검출회로는 직접검출회로(Straight detection circuit)와 평형검출회로(Balanced detection circuit) 두 가지 방법이 적용된다<sup>[25]</sup>.

직접검출회로는 그림 2.7과 같이 검출저항  $R$ 에 표류정전용량이 병렬 접속된 RC 적분회로와 RLC 동조회로의 두 가지 방법이 있다.

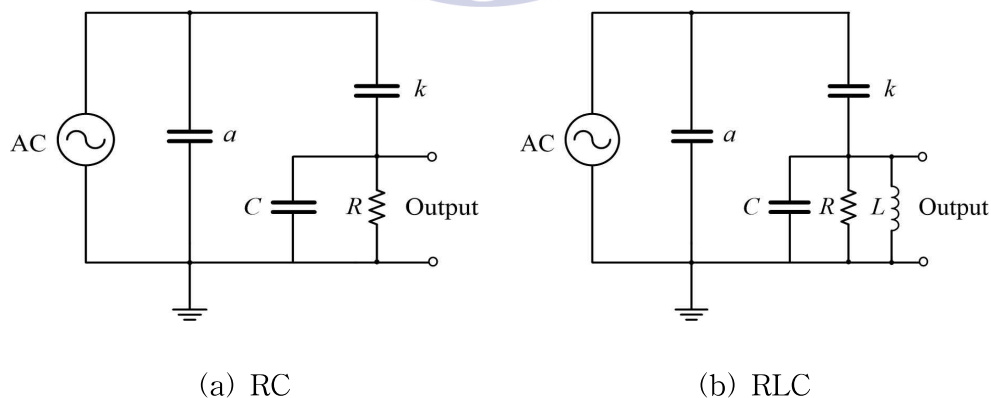


그림 2.7 직접 검출회로

Fig. 2.7 Straight detection circuit



그림 2.7(a)와 같은 RC 회로에서 임펄스 전압은

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{Rm}) \quad (2.10)$$

여기서,  $q$  : 방전의 크기,  $q = b \cdot \Delta V$ 이고, 회로의 합성정전용량  $m$ 은

$$m = \frac{ak}{a + k} + C \quad (2.11)$$

와 같이 표현된다.

그림 2.7(b)의 RLC 회로에서 임펄스는 RC 회로와 같은 파고치로부터 감쇄 진동하게 되고 출력 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{q}{a + C(1 + \frac{a}{k})} \exp(-\frac{t}{2Rm}) \cos \omega t \quad (2.12)$$

여기서,  $\omega = \sqrt{\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}}$  이고,  $m$ 은 회로의 합성정전용량으로 식 (2.11)과 같은 값을 갖는다. 식 (2.10) 및 식 (2.12)에서와 같이 검출 저항 양단의 출력 전압은 방전전하  $q$ 와 결합콘덴서  $k$ 에 비례하며 이 출력전압 측정을 통해 방전전하의 크기를 구할 수 있다.

식 (2.10)과 식 (2.12)와 같이 검출임피던스 양단에 유기되는 펄스크기는 방전전하량  $q$ 와 결합콘덴서  $k$ 에 비례하고 저항  $R$ 과는 무관하다. 그러나  $R$ 이 작아지면 시정수( $\tau = R \times m$ )도 작아지므로 펄스의 과미장이 짧아져 관측장치가 검출을 못하는 경우가 발생한다. 따라서 부분방전으로 인한

펄스를 충분히 검출할 수 있도록 RLC 정수를 적절히 조합할 필요가 있다.

평형검출회로 역시 기본회로를 동일하게 사용할 수 있으며 시료에서의 방전은 직접검출회로와 같은 원리로 검출되지만 시료 외부로부터의 방전 펄스 및 잡음 등은 평형회로에 의해 상쇄된다. 즉, 고전압 변압기 및 고전압 접속단자에서 발생하는 방전 또는 코로나 등과 같은 왜곡을 적절히 억제할 수 있다.

평형검출회로는 시료  $a$  및 결합콘덴서  $k$ 에 각각 총 2개의 검출임피던스를 설치하고 여기에서 검출된 신호는 차동 증폭기를 통해 측정된다. 시료와 결합콘덴서의 용량이 동일하고 검출임피던스가 같은 경우, 외부 잡음 신호는 서로 상쇄되고 부분방전 신호는 반대극성의 동일한 신호가 검출되므로 최종 출력은 방전신호의 두 배의 크기로 얻어진다. 실제 적용에 있어서는 회로 사이의 표류정전용량을 고려해야 하며, 이를 고려한 회로는 그림 2.8과 같이 나타낼 수 있다.

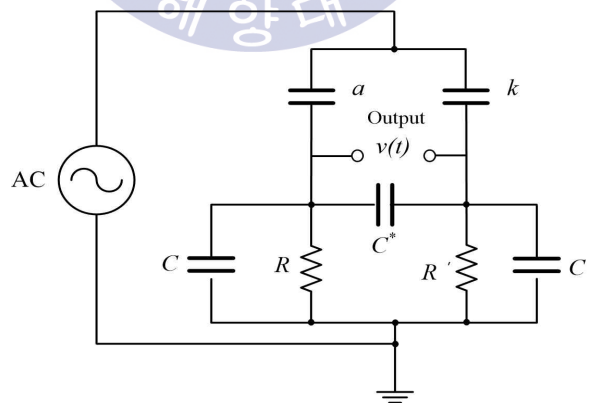


그림 2.8 평형 검출회로

Fig. 2.8 Balanced detection circuit

그림 2.8에서 검출임피던스 사이에 나타나는 부분방전 검출전압은

$$v(t) = \frac{q}{a + C + (n + 1) C^*} \times e^{-t/\tau} \quad (2.13)$$

과 같이 얻어진다. 여기서,  $C$  및  $C^*$ 는 회로 사이에 존재하는 표류정전용량이고,  $n$ 은 검출회로의 평형정도를 나타내는 값으로 식 (2.14)와 같이 표현되며,  $\tau$ 는 회로의 시정수로 식 (2.15)와 같이 표현된다.

$$n = \frac{a}{k} = \frac{R'}{R} = \frac{C'}{C} \quad (2.14)$$

$$\tau = R \times [a + C + (n + 1) C^*] \quad (2.15)$$

평형검출회로는 직접검출회로에 비해 외부에서 발생하는 방전신호 및 전기적 잡음 신호 억제에 이점을 가지고 있다. 그러나 복잡한 회로 구성을 가지며 동일한 시험대상에 대하여 정전용량의 차이를 가지게 되면 신호의 왜곡이 발생하여 각 시험대상에 따라 결합콘덴서 및 검출임피던스를 다시 선정하여야 하고, 평형도를 맞추기 위한 절차가 필요하다.

## ② UHF 검출

부분방전은 수 ns정도의 매우 짧은 상승시간을 가지며, 방전펄스에 의해 수 백 kHz~수 GHz 이상의 주파수 대역을 갖는 전자파를 방출한다. 이때 발생하는 전자파는 표 2.5에 나타난 것과 같이 반사, 산란, 회절 및 굴절의 특성을 가지고 있으며, 전자파가 진행하다가 금속도체를 만날 경우 이러한 성질에 의하여 거의 모든 에너지가 전류로 변화하여 도체로 도통하게 된다.

표 2.5 전자파의 특성

Table 2.5 Characteristics of electromagnetic wave

성 질	개 요
반사	전자파는 금속을 만나면 완전반사하며, 이러한 성질을 이용하여 전자파를 차폐하거나 특정 방향으로 보내는 것이 가능하다. 또한 전자파는 서로 다른 매질을 만났을 때 일정량이 반사되는데 이때의 입사각과 반사각은 같으며, 이를 스넬의 법칙(Snell's law)이라 한다.
산란	전자파가 어떤 물질을 만나 그 물질 표면의 구조특성에 따라 사방으로 흩어지는 현상이다.
회절	전자파가 장애물을 마주쳤을 때, 옆으로 돌아서 진행하는 현상으로 저주파일수록 회절성이 강하고 고주파에서는 전자파의 직진성이 강해져 회절성이 약하다.
굴절	물리적 성분이 다른 재질에 전자파가 입사했을 때, 그 재질차이에 의해 진행방향이 변화하는 현상이다.

금속도체로 이루어진 안테나 등의 센서로 UHF 대역(300 MHz~3 GHz)의 전자파를 측정하는 것을 전자파 검출 또는 UHF 검출이라고 한다. 이는 검출감도가 좋고, 검출범위가 넓기 때문에 하나의 센서로 광범위한 측정이 가능하고, 다수의 센서로 위치추정도 할 수 있다<sup>[26]~[28]</sup>. 또한 외부노이즈의 영향이 적고 온라인 모니터링이 가능하기 때문에 가스절연개폐장치의 부분방전 검출에 가장 많이 이용되고 있으며, 그림 2.9와 같이 외함에 UHF 센서를 설치할 수 있는 구조로 설계되어 진다. UHF 센서는 내부 및 외부 센서로 분류할 수 있으며, 각각은 방송(470 MHz~800 MHz) 및 통신(800 MHz~2,300 MHz)대역의 잡음을 고려하여야 한다.

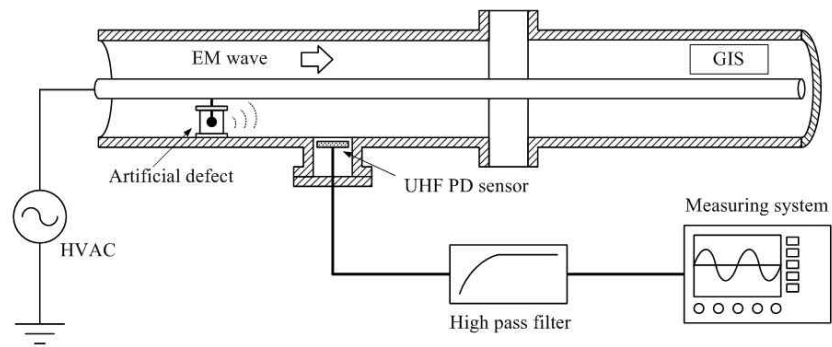


그림 2.9 UHF 검출

Fig. 2.9 UHF detection

### ③ 음향 검출(Acoustic detection)

부분방전에 의해 가스절연개폐장치 내부에 펄스형태의 음향신호가 발생하며, 이 신호는 탄성진동파로 가스절연개폐장치의 내벽에 전파되어 기계적 진동으로 변환되고, 외함에 설치된 AE(Acoustic emission) 센서에 의해 검출되는데 이를 음향 검출이라고 한다<sup>[29]</sup>. 이 측정법은 센서를 자석을 이용하여 외함에 부착하기 때문에 측정이 간편하고 온라인 모니터링이 가능하다. 음향신호의 측정시스템은 그림 2.10과 같이 센서, 증폭기 및 필터 등의 검출부와 오실로스코프 및 기록계 등의 기록부로 구성된다. 일반적으로 검출된 음향신호는 매우 미소하기 때문에 증폭기 및 필터를 사용하여 미소한 신호를 증폭하여 센서의 감도를 개선하고 원하는 신호만을 검출한다<sup>[30]~[32]</sup>.

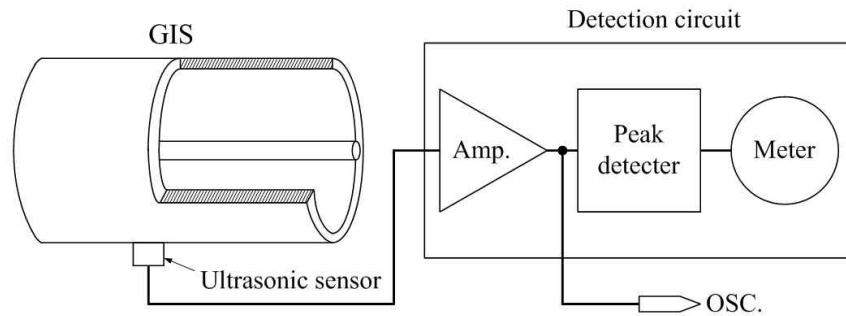


그림 2.10 음향 검출

Fig. 2.10 Acoustic detection

특히 음향 검출법은 다수의 센서를 설치하여 신호도달차를 측정하면 결함의 위치를 추정할 수 있고, 현장에서 측정시 전기적 노이즈의 영향이 별로 없기 때문에 신뢰성이 좋다는 장점이 있다. 그러나 음향측정법은 감도가 낮고 음향 신호만으로는 부분방전 전하량을 검출할 수 없기 때문에 신뢰도가 확립되어 있지않은 단점이 있다.

#### ④ 표면전위 검출

가스절연개폐장치 내부에서 부분방전 발생 시에 고주파 전류가 외함에 흐르게 되고 외함 전위가 과도적으로 상승하게 되는데 이때 탱크와 접지간에 생기는 미소한 전위차를 고주파 광대역 프로브로 측정하고, 잡음제거회로에서 처리하여 외부 노이즈를 줄여 가스절연개폐장치 내부의 부분방전만을 추출한다. 절연스페이스법과 함께 측정기는 소형, 경량 및 이동식으로써 운전 중이라도 간편하게 적용할 수 있다.

#### ⑤ 가스 검출

가스절연개폐장치 내부에서 부분방전이 발생하면  $\text{SOF}_4$ ,  $\text{SOF}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{F}_2$ ,

SO<sub>2</sub> 등의 여러 가지 성분의 혼합시료에 대한 가스를 분석하여 부분방전의 유무를 판단할 수 있는 가스 크로마토그래피(Gas chromatography)가 많이 사용되고 있다. 또한, 가스 크로마토그래피를 이용한 가스분석 장치가 개발되고 있으며, CF<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, 수분의 분석도 가능하다. 또한 분해가스량과 방전전하량 사이에 일정한 관계가 있기 때문에 변색 길이로 대략적인 방전전하량을 알 수 있다.

#### 라. 부분방전 분석법

외부 노이즈로 인하여 부분방전을 분석하는데 많은 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 노이즈 제거 기술 및 다양한 분석법이 개발되었다.

##### ① T-F map

정해진 시간동안 신호의 주파수 성분과 시간에 대한 진폭의 변화를 분석하는 것으로, 처리속도가 빠르고 측정된 신호의 크기, 극성 및 변화뿐만 아니라 노이즈 검출에 용이하고 결함판별이 가능한 장점이 있다.<sup>[33]~[35]</sup>.

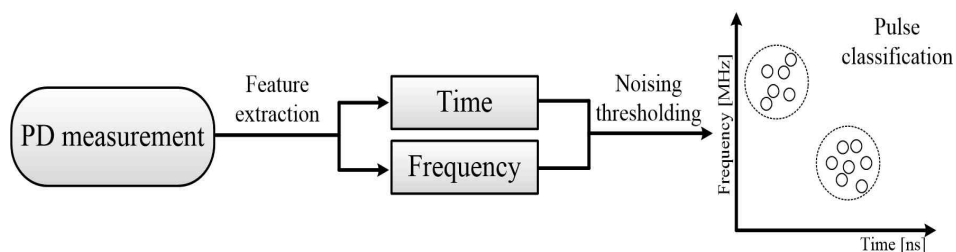


그림 2.11 신호처리 시스템의 구조

Fig. 2.11 Architecture of a signal processing system

그림 2.11은 T-F map의 신호 처리과정을 나타낸 것으로, 부분방전을 측정하고 신호의 정규화 과정을 통하여 처리한다. 정규화된 신호는 식 (2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad s(t) \in [0, T] \quad (2.16)$$

통계학의 표준편차 수식을 이용하여 펄스파형을 이차함수로 표현하였으며, 다음 식 (2.17), 식 (2.18)과 같다. 이때  $\sigma_T$  와  $\sigma_F$ 는 각각 시간과 주파수 도메인에서의 표준편차이다.

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (2.17)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^T f^2 |\tilde{s}(f)|^2 df} \quad (2.18)$$

$\tilde{s}(f)$ 는  $\tilde{s}(t)$ 의 푸리에 변환품이며,  $t_0$ 는 정규화된 신호의 무게중심으로 식 (2.19)와 같이 표현된다.

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (2.19)$$

상기의 식을 이용하여 T-F map을 표현할 수 있으며, 노이즈를 제거한 부분방전의 시간 및 주파수에 대한 특징으로부터 결함판별이 가능하다.



## ② 펄스파형분석

인가된 전원주파수(60 Hz)의 Positive half( $0^\circ \sim 180^\circ$ )와 Negative half( $180^\circ \sim 360^\circ$ )에서 측정된 부분방전 펄스의 시간적 형상과 물리적 형상을 분석하여 결함을 판별하는 방법이다. 부분방전 펄스는 발생 후 그림 2.12와 같이 감쇄 진동하는 형태이며, 첫 번째 발생한 제 1진동과 2번째 발생한 제 2진동으로 나누어 분석한다. 각 진동에 대해 상승시간( $T_r$ )은 0%에서 최고치( $V_{max}$ )의 100%까지 상승하는데 걸린 시간, 하강시간( $T_f$ )은 100%에서 0%까지 하강하는데 걸린 시간이며, 상승시간과 하강시간의 합을 진동 폭( $T_w$ )으로 하여 시간적 형상을 분석한다.

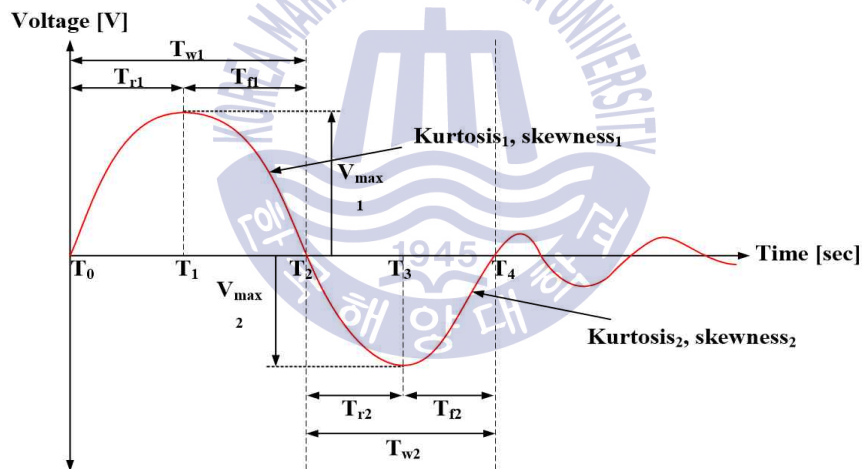


그림 2.12 부분방전 펄스의 파라미터

Fig. 2.12 Parameters of a PD pulse

또한 펄스의 물리적 형상을 분석할 수 있도록 첨도(Kurtosis)와 왜도(Skewness)를 이용하여, 진동별 특징을 추출한다. 첨도는 그림 2.13(a)와 같이 펄스에서 중앙부분의 첨예(尖銳)한 정도를 파악하는 파라미터로써, 그 값이 양수일 경우에는 급첨(Leptokurtic)이라고 하고, 음수일 경우에는

평첨(Flattykurtic)이라고 한다. 만약 0일 경우에는 정규분포를 이루며 정상분포 (Mesokurtic)라고 한다<sup>[36],[37]</sup>. 왜도는 펄스 형상의 대칭성을 파악하는 것으로 왜도가 0보다 크면 우측으로 긴 꼬리를 갖는 양의 왜도 (Positive skew)이 되고, 0보다 작으면 좌측으로 긴 꼬리를 갖는 음의 왜도 (Negative skew)이 된다. 따라서 왜도의 값에 따른 확률분포는 그림 2.13(b)와 같다.

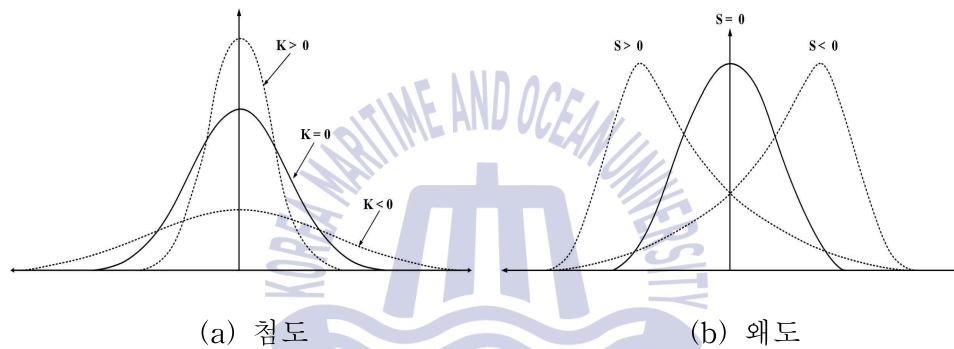


그림 2.13 첨도와 왜도

Fig. 2.13 An example of the kurtosis and the skewness

첨도와 왜도는 각각 다음 식 (2.20)과 (2.21)로 구할 수 있다. 이때  $\mu$ 는  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 인 값으로부터의 평균이며,  $\sigma^2$ 은 표본분산이다.

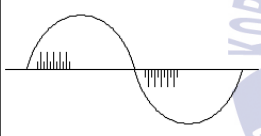
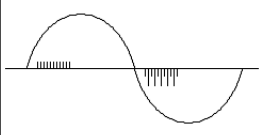
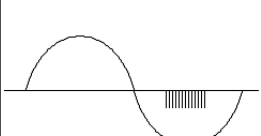
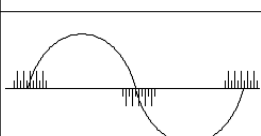
$$K = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x_i - \mu)^4}{(n-1) \cdot \sigma^4} \right] - 3 \quad (2.20)$$

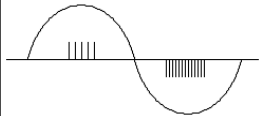
$$S = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x_i - \mu)^3}{(n-1) \cdot \sigma^3} \right] \quad (2.21)$$

### ③ PRPD(Phase resolved partial discharge)

PRPD는 부분방전의 결함원인을 판별하는데 있어서 가장 보편적으로 사용하는 방법 중 하나이다. 교류용 고전압설비에서 HFCT, UHF안테나 및 외피전극 등의 장치로 부분방전 펄스를 측정하여 결함별로 고유한 패턴을 도출한다. 특히, 인가전압에 따른 위상( $\Phi$ ), 전하량( $q$ ) 및 발생횟수( $n$ )를 누적하거나, 순차적인 시퀀스로 분석하여 결함원을 판별하는 방법이다<sup>[38],[39]</sup>. 대표적인 부분방전펄스의 위상분포 패턴은 표 2.6과 같다.

표 2.6 부분방전펄스의 위상분포  
Table 2.6 Phase distributions of PD pulses

	위상분포 패턴	특 성	원 인
1		<ul style="list-style-type: none"> <li>영점과 첩두값 사이에 방전펄스 발생</li> <li>정극성 및 부극성에서 동일한 특성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>고체절연체 내부의 보이드에서 방전 발생</li> <li>전극과 접촉이 없는 연면방전</li> </ul>
2		<ul style="list-style-type: none"> <li>영점과 첩두값 사이에 방전펄스 발생</li> <li>한쪽 극성에서 방전의 크기가 크게 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>전극주위의 절연체내 보이드에서 방전 발생</li> <li>정극성 : 고압측</li> <li>부극성 : 접지측</li> </ul>
3		<ul style="list-style-type: none"> <li>동일한 크기의 방전이 한쪽 극성 첩두값에서 발생</li> <li>전압증가에 따라 발생 수 증가, 크기는 일정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>가스내 전극의 침예한 부분에서 방전 발생</li> <li>정극성 : 고압측</li> <li>부극성 : 접지측</li> </ul>
4		<ul style="list-style-type: none"> <li>영점부근에서 방전펄스 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>금속부위나 반도체층에서 불완전 접속에 의해 방전 발생</li> </ul>

5		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양쪽 극성 침투값 부근에서 방전 발생</li> <li>• 극성에 따라 크기는 동일하지만 발생 수가 다르게 나타남</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 액체절연체내 전극의 침투한 부분에서 발생</li> <li>• 정극성 : 고압측</li> <li>• 부극성 : 접지측</li> </ul>
---	---	--	--

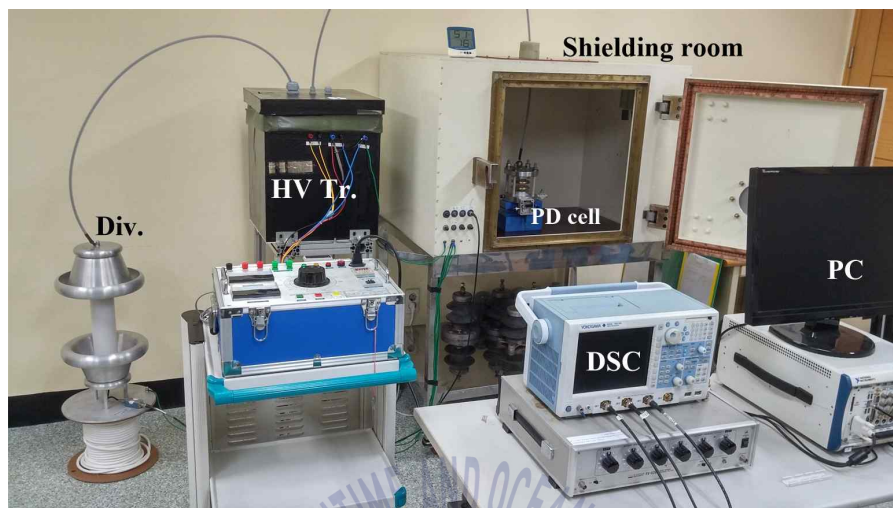


## 제 3 장 실험 및 분석

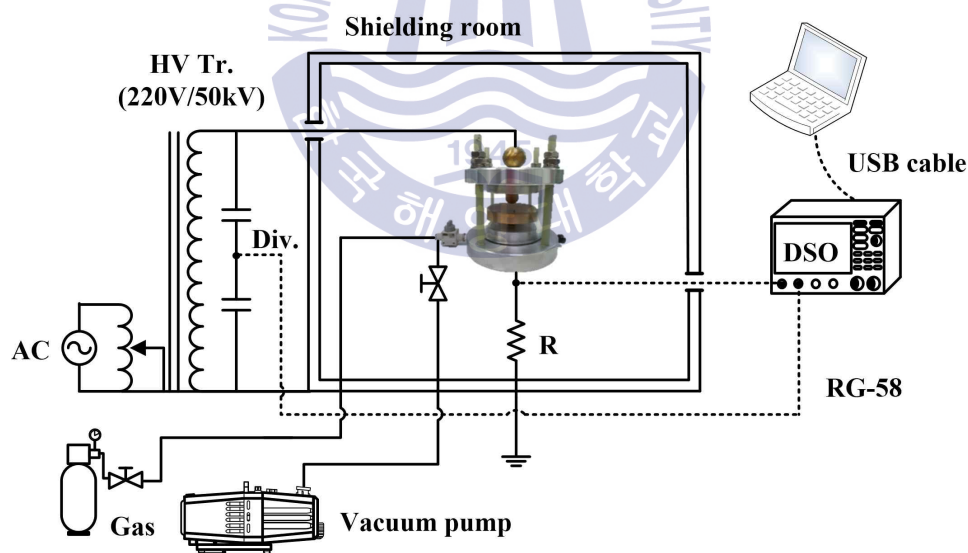
### 3.1 실험계

#### 가. 측정 시스템

외부 노이즈의 영향을 최소화하여 부분방전 펄스를 검출하기 위하여 차폐함(Shielding room)을 이용하여 그림 3.1과 같이 실험계를 구성하였다. 차폐함의 크기는 1,020 mm(L) × 720 mm(W) × 760 mm(H)이며, 내부에 전극계를 설치하고 고전압을 인가할 수 있는 구조이다. 차폐함 내부의 전극계에는 최대 50 kV까지 전압이 인가되므로 고압케이블과 차폐함 사이에 충분한 절연내력이 확보되지 않으면 절연파괴 및 코로나를 발생시킬 수 있다. 이를 방지하기 위하여 에폭시 재질의 절연부를 제작하였다. 또한 고압 케이블과 전극계의 접속부에서 코로나를 방지하기 위해 직경 30 mm 황동재질의 금구를 제작하여 설치하였다. 최대 출력전압 50 kV, 출력전류가 30 mA인 몰드형 고압 변압기를 사용하여 전극계에 전압을 인가하였으며, 10,000:1 분압기로 인가전압을 측정하였다. 변압기는 절연유 내부에 함침(含浸)시켜 접속부에서의 코로나 발생을 방지하였다. 전극계 내부 압력은 0.4 MPa와 0.5 MPa로 충전하였으며, 가스 주입 전에는 진공펌프(120  $\ell$ /min)를 이용해 전극계 내부를  $10^{-3}$  torr로 하여 서로 다른 비율의 가스가 섞이는 것을 방지하였다. 도전성 이물질의 경우 부분방전 특성이 파티클의 움직임에 영향을 받기 때문에 초당 1,000프레임(1,280×1,024 pixels) 측정 가능한 초고속카메라를 이용하여 전극계 내부를 관찰하였다. 또한 측정된 부분방전펄스는 오실로스코프(샘플링 속도: 5 GS/s, 주파수대역: 1 GHz)와 LabVIEW 기반의 DAQ로 분석하였다.



(a) 사진



(b) 구성도

그림 3.1 실험계의 구성

Fig. 3.1 Experimental setup

고압 변압기의 측정단자에서 인가전압의 위상을 측정하였으며, 그림 3.2에 나타난 것과 같이 오차율 1%의 50Ω 정밀저항을 전극계와 접지선 사이에 설치하여 부분방전 펄스를 검출하였다.

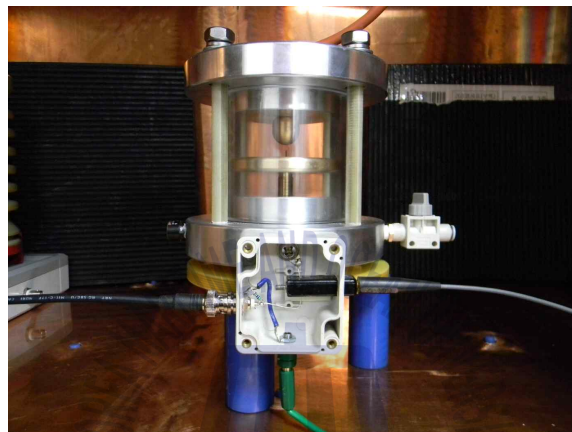
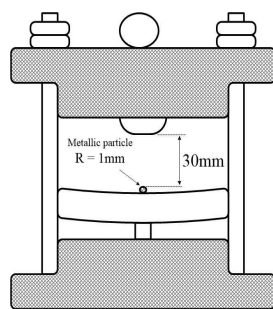


그림 3.2 검출저항

Fig. 3.2 Detection resistor

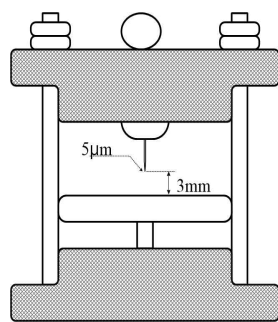
## 나. 전극계

가스절연개폐장치에서 가장 빈번하게 발생하는 결함은 도전성 이물질로 전체결함의 50% 이상을 차지한다. 제조, 조립 및 운반 시에 생성 또는 혼입된 파티클은 전압이 인가됨에 따라 가스절연개폐장치의 외함을 돌아다니거나 고압부로 점핑하기도 하며 고체절연물인 스페이서(Spacer)에 부착되는 경우도 있다. 고체절연물에 부착되어 발생하는 결함은 대부분 이러한 과정으로 형성된 것이다. 도체 돌출 및 외함 돌출 결함 역시 가스절연개폐장치 내부를 부유하던 파티클에 의해 종종 발생한다. 따라서 본 논문에서 도전성 이물질과 그로 인해서 발생될 수 있는 결함인 도체 돌출 및 외함 돌출 전극계를 제작하였으며, 그림 3.3에 나타내었다. (a)는 도전성 이물질로 지름 1 mm인 알루미늄 볼을 사용하였으며, 전극간은 30 mm로 하였다. (b)와 (c)는 도체 돌출 및 외함 돌출을 모의한 것으로 각각의 평판전극은 텅스텐-구리합금으로 지름 80 mm, 두께 10 mm이며 가장자리를 둥글게 하여 전계가 집중되지 않게 하였다. 또한 침전극은 곡률반경을 5  $\mu\text{m}$ 이며, 평판-침전극간은 3 mm이다.

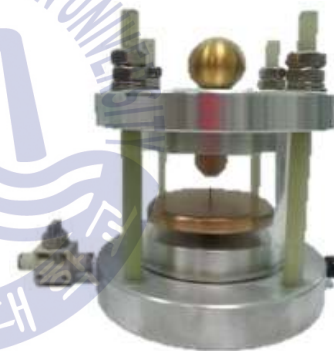
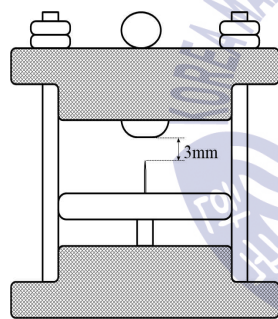


(a) Free particle





(b) Protrusion on conductor



(c) Protrusion on enclosure

그림 3.3 전극계

Fig. 3.3 Electrode system

### 3.2 실험 방법

부분방전의 측정을 위해 사용한 가스 비율은 총 5가지로 다음의 표 3.1과 같다. 전극계 내부의 압력은 가스절연개폐장치에서 결함이 빈번하게 발생하는 단로기 및 접지스위치 내부 압력과 동일한 0.4 MPa과 0.5 MPa로 하였다.

표 3.1 가스 혼합비율

Table 3.1 Ratio of mixture gases

SF <sub>6</sub>	100%	80%	50%	20%	-
N <sub>2</sub>	-	20%	50%	80%	100%

이중 가스혼합 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째는 압력비를 이용한 방법으로, 얻고자하는 혼합비율만큼 두 가스 압력을 알맞게 주입하는 것이다. 예를 들어 SF<sub>6</sub> 80%와 N<sub>2</sub> 20%의 혼합가스를 0.5 MPa로 만들기 위해서 압력게이지를 이용해 SF<sub>6</sub>는 0.4 MPa, N<sub>2</sub>는 0.1 MPa를 주입한다. 이 방법은 온도, 대기압 등의 환경적 요인과 주입하는 사람의 오차 등으로 정확한 혼합비를 얻기 힘들다. 본 논문에서 사용한 방법은 질량비를 이용한 것으로, 가스의 질량을 측정하여 두 가지의 가스를 혼합하기 때문에 보다 정확한 혼합비를 얻을 수 있다<sup>[40]</sup>.

보통 가스절연개폐장치에 SF<sub>6</sub>를 주입하기 전에 보통  $2 \times 10^{-1}$  torr 이하의 진공도를 유지시킨 다음 가스를 충전한다. 표 3.2는 압력에 따른 분자밀도를 나타낸 것으로 진공도가  $10^{-1}$ 씩 높아질수록 분자밀도는  $10^1$ 씩 감소한다. 본 실험에 사용한 진공펌프는 펌핑속도가 120 ℓ/min, 최대  $6.7 \times 10^{-2}$  Pa까지 진공상태를 만들 수 있다. 이를 이용하여 전극계 내부 압력을

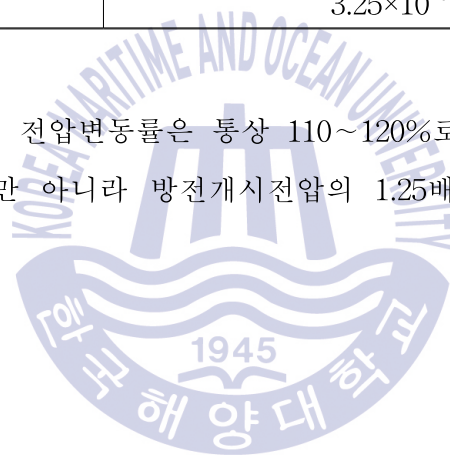
$10^{-3}$  torr의 상태로 만들어 잔류하는 가스의 영향을 최소화하였다.

표 3.2 압력에 따른 분자밀도(공기, 25°C)

Table 3.2 Value of molecular density as a function of pressure(for air at 25°C)

Pressure [torr]	Molecular density [molec/cm <sup>3</sup> ]
760	$2.46 \times 10^{19}$
1	$3.25 \times 10^{16}$
$10^{-3}$	$3.25 \times 10^{13}$
$10^{-6}$	$3.25 \times 10^{10}$

운전 중인 설비의 전압변동률은 통상 110~120%로, 이를 고려하여, 방전개시전압에서 뿐만 아니라 방전개시전압의 1.25배 전압에서도 각각의 특성을 분석하였다.



### 3.3 분석 알고리즘

부분방전 신호를 측정하고 위상에 따른 PRPD 분석을 위하여 알고리즘 및 VI(Virtual instrument)를 설계하였다. VI는 부분방전 신호의 측정과 실시간  $\Phi-q$  분석을 위하여 RTOS(Real-time operating system) 기반으로 작성하였다.

측정오차를 최소화하기 위하여 Fetch record 기능을 사용하여 On-board 메모리로 일시적으로 데이터를 저장한 후 호출하는 형태로 설계하였다. 검출된 기능은 Peak hold 기능을 이용하여 방전펄스를 추출하였으며, 측정이 끝난 후 인가전압의 위상( $\Phi$ ), 부분방전 펄스의 크기( $q$ ) 그리고 발생 횟수( $n$ )에 대해 빠르고 일률적인 처리를 위하여 Dynamic-sequence 기능을 가지는 ‘Standard state machine’ 구조를 사용하였다. 분석 알고리즘의 수행은 그림 3.4와 같은 순서로 진행된다.

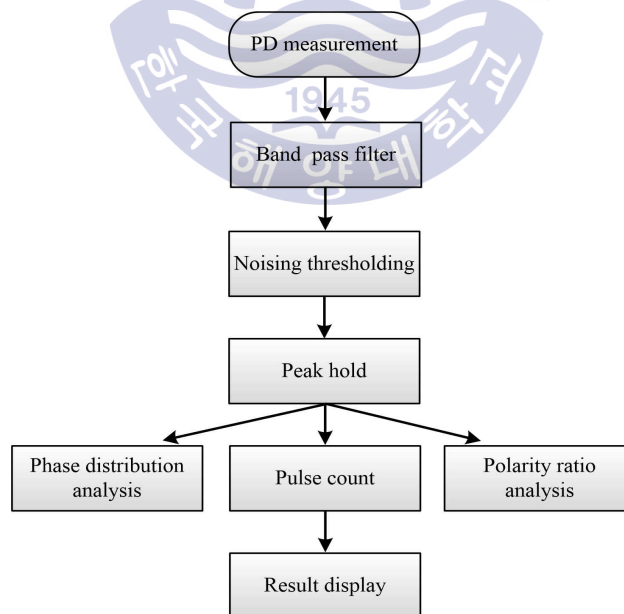


그림 3.4 부분방전 분석 알고리즘의 순서도

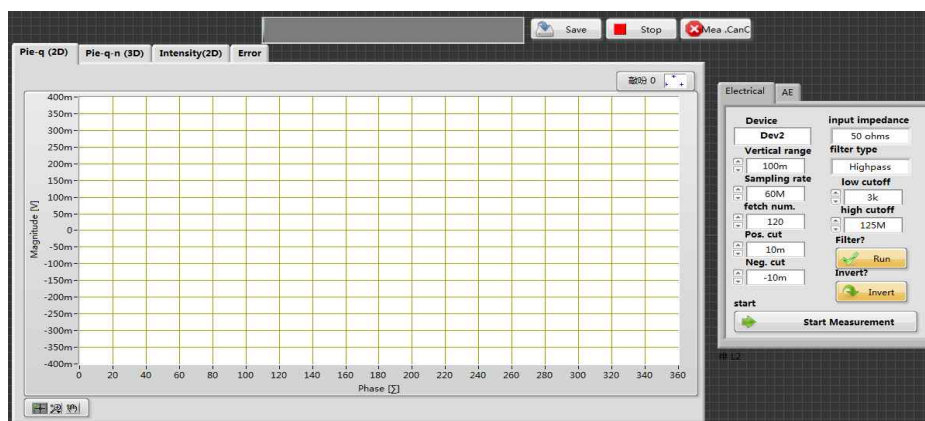
Fig. 3.4 Flowchart of a PD analysis algorithm

PRPD 분석 알고리즘은 그림 3.5(b)의 신호 측정부에 의해  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  위상의 한 주기 동안 발생한 부분방전 신호를 수집하고 분석하며, 각 주기 단위의 신호는 500,000 window로 표현하고 window의 간격은  $0.00072^{\circ}$ 로 부분방전 신호를 측정할 수 있다.

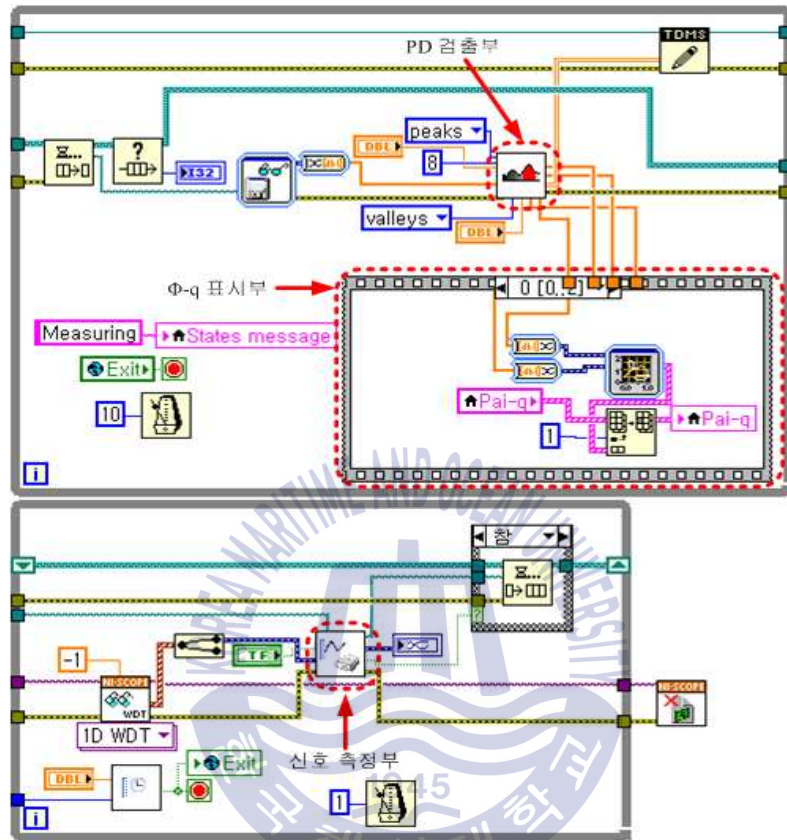
수집된 신호는 그림 3.5(b)에 나타난 Peak holder 기법을 이용하여 설계한 Sub VI의 PD 검출부를 통해 연산되고  $\Phi-q$  표시부에 의하여 실시간으로 프런트패널의 그래프에 표현되며 연산된 데이터는 누적하여 저장한다.

데이터 수집이 끝난 후, 누적 저장된 신호를 재호출하여 그림 3.5(c)의 정렬 및 카운팅, 방전량 처리 및 총 방전횟수 카운트 Sub VI를 통하여 각각의 수집된 데이터를 연산하고 배열한다. 최종적으로 그림 3.5(d)의 연산 알고리즘에 따라 측정 결과를 프런트 패널에 나타내며, 각각의 그래프들은 csv 및 그래픽 파일로 저장하게 된다.

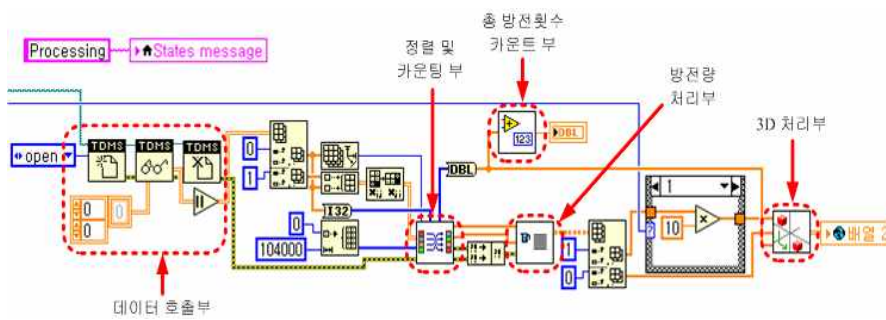
각각의 알고리즘은 연산 수행의 효율성을 높이고자 각각의 Sub VI를 적용하여 부분방전 신호의 측정과 분석이 최적화되도록 하였다.



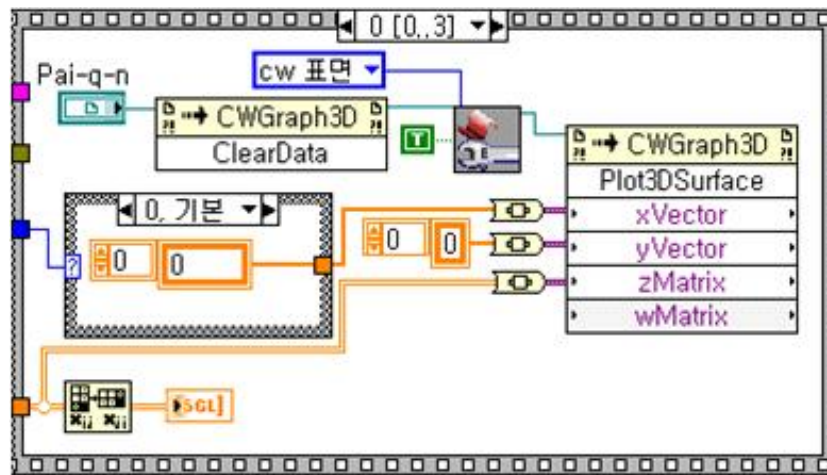
(a) 프런트 패널



(b) 측정부



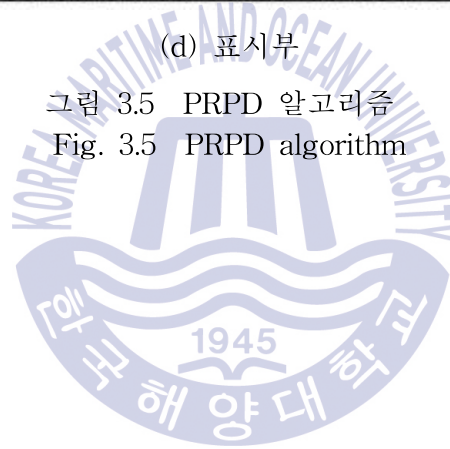
(c) 연산 처리부



(d) 표시부

그림 3.5 PRPD 알고리즘

Fig. 3.5 PRPD algorithm





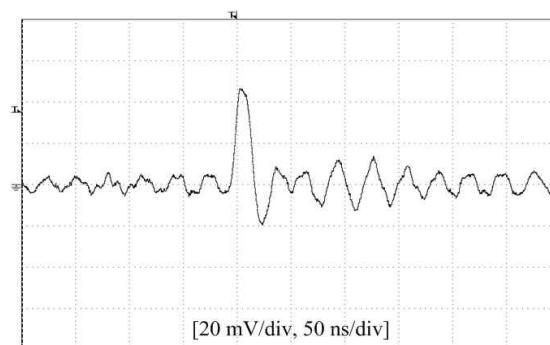
## 제 4 장 결과 및 분석

가스 혼합비율에 따라 결함별로 각기 다른 특성을 나타내며, 그에 따른 위험도가 달라질 수 있으므로 이를 분석하는 것이 매우 중요하다. 특히 방전개시전압과 같은 낮은 전압에서의 특성은 절연진단에 필수적 요소이며 절연설계 시에 많은 정보를 제공할 수 있다.

방전 개시 및 소멸 전압은 결함의 크기와 상태 등에 따라 달라지며 절댓값을 가지지 않는다. 이는 가스 혼합비율에 따른 경향이 중요하기 때문에, 최솟값과 최댓값의 범위를 나타내었다. 또한 부분방전 펄스는 측정시간에 따라 크기나 횟수가 달라지지만 오차가 크지 않으며, 누적된 데이터를 측정하기 때문에 각각의 평균값을 분석하였다.

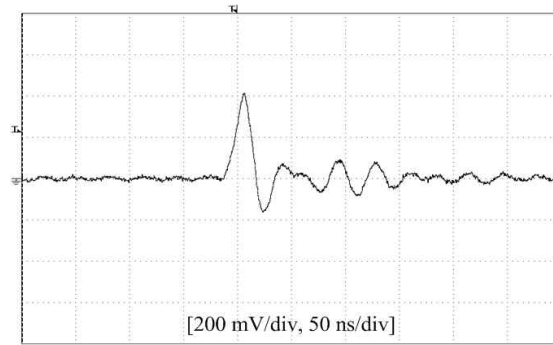
### 4.1 교정 실험

검출저항에 의한 측정시스템의 검출감도를 평가하기 위하여 표준펄스 발생장치(CAL 1A, Power Diagnostix)를 이용하여 교정실험을 수행하였다. 10 pC~100 pC까지의 입력펄스에 대한 시스템의 응답전압을 측정하였으며, 그림 4.1에 측정파형의 예를 나타내었다.



(a) 10 pC





(b) 100 pC

그림 4.1 측정파형의 예

Fig. 4.1 Example of waveform

입력펄스에 대한 측정 시스템의 출력전압은 그림 4.2와 같이 10 pC에서 100 pC까지 선형적인 출력특성을 나타내었으며, 환산 감도는 4 mV/pC이다. 결과로부터 1 pC에 해당하는 4 mV를 방전 개시 및 소멸 전압의 기준으로 하였다.

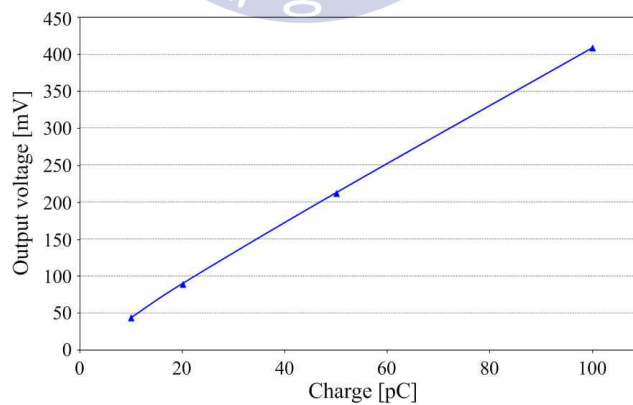


그림 4.2 교정펄스에 대한 출력전압

Fig. 4.2 Output voltage of calibrating pulse

## 4.2 결함별 부분방전 특성 분석

결함에 따른 방전 개시 및 소멸 전압을 측정하고 이 때의 펄스크기, 펄스 수, 위상분포 및 극성비를 분석하였으며, 방전개시전압의 1.25배 증가시킨 전압에서도 동일하게 실험을 수행하였다.

### 가. 도전성 이물질

가스절연개폐장치에서 가장 흔하게 나타나는 결함으로, 도전성 이물질의 영향에 관련된 많은 연구가 진행 중에 있다<sup>[41]</sup>.

#### ① 방전개시전압

방전개시전압은 그림 4.3과 같으며, 혼합 가스비율의 영향 없이 비슷한 전압에서 방전이 발생하였다. 파티클이 움직이지 않을 때에는 부분방전이 측정되지 않다가 움직임이 관측되었을 때에 비로소 방전신호가 나타났으며, 이는 파티클의 위치의 영향을 많이 받았다. 다른 결함에 비해서 방전개시전압의 범위가 크고 파티클의 움직임으로 인하여 부분방전이 매우 간헐적으로 나타났다. 이물질의 운동이 멈춤과 동시에 방전은 소멸하였으며, 이 때의 전압을 방전소멸전압이라고 한다. 방전개시전압과 마찬가지로 모든 혼합비에서 거의 동일하였으며, 그림 4.4와 같다. 압력이 낮아짐에 따라 방전개시전압 및 소멸전압도 감소하였으나, 변화율은 6% 미만이었다. 방전 개시 및 소멸 전압이 가스 혼합비율보다는 파티클의 위치와 움직임에 더 많은 영향을 받았다.

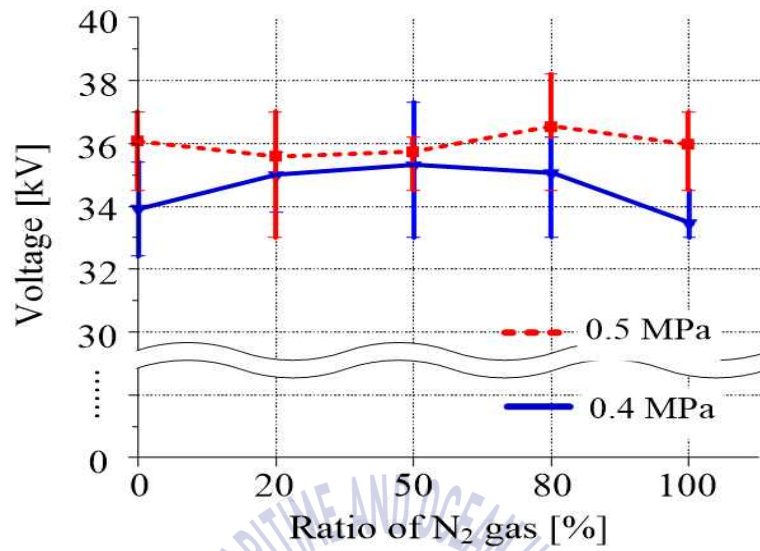


그림 4.3 방전개시전압

Fig. 4.3 Discharge inception voltage

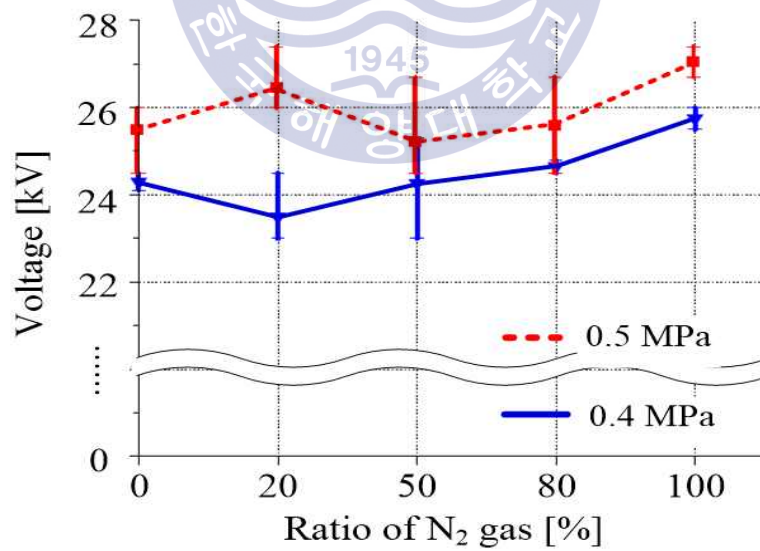


그림 4.4 방전소멸전압

Fig. 4.4 Discharge extinction voltage

4.1과 표 4.2는 방전 개시전압 및 소멸전압의 평균을 정리한 것으로, 파티클이 고압부와 가까이 있을 때에는 방전개시전압이 낮았으며, 반대로 멀리 있으면 높게 나타났다. 그러나 SF<sub>6</sub> 100% 대비 변화가 방전개시전압은 4% 미만, 방전소멸전압은 6% 미만에 불과하였다. 앞서 언급했듯이 도전성 이물질의 방전 개시전압 및 소멸전압은 가스 혼합비율 및 압력보다는 파티클의 움직임, 위치에 많은 영향을 받았다.

표 4.1 방전개시전압

Table 4.1 Discharge inception voltage

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	33.9 kV	35.0 kV	35.3 kV	35.0 kV	33.4 kV
0.5 MPa	36.1 kV	35.6 kV	35.7 kV	36.5 kV	36.0 kV

표 4.2 방전소멸전압

Table 4.2 Discharge extinction voltage

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	24.3 kV	23.5 kV	24.3 kV	24.7 kV	25.8 kV
0.5 MPa	25.5 kV	26.5 kV	25.2 kV	25.6 kV	27.1 kV

방전개시전압에서의 최대 및 평균 펄스크기를 측정하였으며, 각각 그림 4.5와 그림 4.6에 나타내었다. SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%의 경우 0.4 MPa일 때 평균 크기가 0.5 MPa보다 높았으나, 그 외에는 압력이 증가할수록 최대 및 평균 펄스가 크게 나타났다.

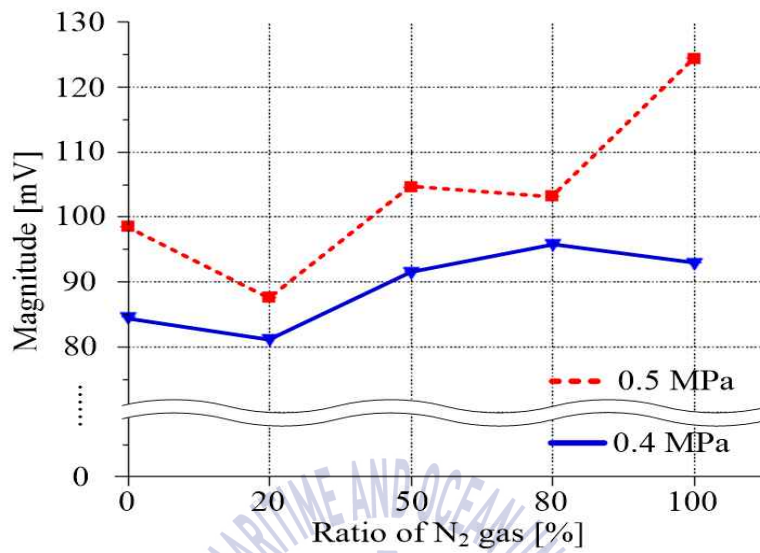


그림 4.5 최대펄스의 크기(at DIV)

Fig. 4.5 Maximum pulse magnitude(at DIV)

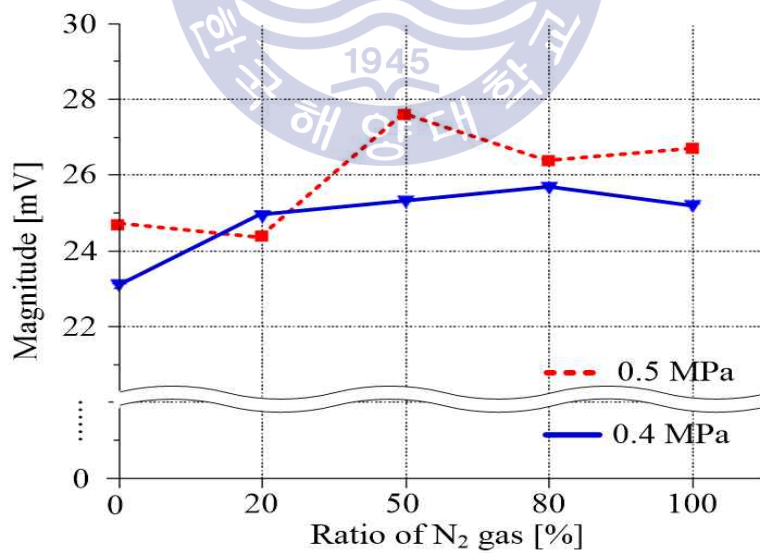


그림 4.6 평균펄스의 크기(at DIV)

Fig. 4.6 Average pulse magnitude(at DIV)

표 4.3과 표 4.4는 최대 및 평균 펄스크기를 정리한 것이다. 최대펄스크기의 경우 0.4 MPa일 때, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서 가장 높았으며 이는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 13% 증가한 것이다. 0.5 MPa일 때는 N<sub>2</sub> 100%에서 최댓값이 측정되었으며, SF<sub>6</sub> 100% 대비 26% 가량 높았다. 평균펄스크기는 0.4 MPa일 때는 SF<sub>6</sub> 100%에서 최솟값이 측정되었으며, 그 외에 혼합비율에서는 비슷하였다. 0.5 MPa일 때는 SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%가 SF<sub>6</sub> 100% 대비 12% 증가로 평균펄스크기가 가장 높았다.

도전성 이물질의 경우 파티클의 움직임과 위치의 영향으로 최대 및 평균 펄스크기가 다른 결함들에 비해 매우 높고, 최대 및 평균 펄스크기의 차이도 매우 크게 나타났다.

표 4.3 최대펄스의 크기(at DIV)

Table 4.3 Maximum pulse magnitude(at DIV)

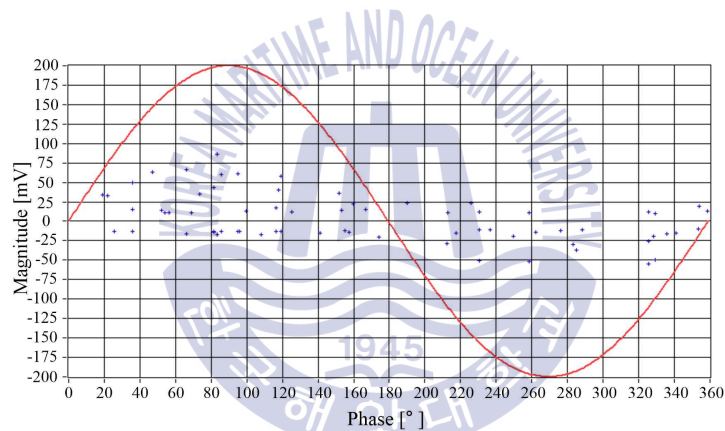
구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	84.7 mV	81.3 mV	91.6 mV	96.0 mV	93.0 mV
0.5 MPa	98.6 mV	87.6 mV	104.7 mV	103.2 mV	124.5 mV

표 4.4 평균펄스의 크기(at DIV)

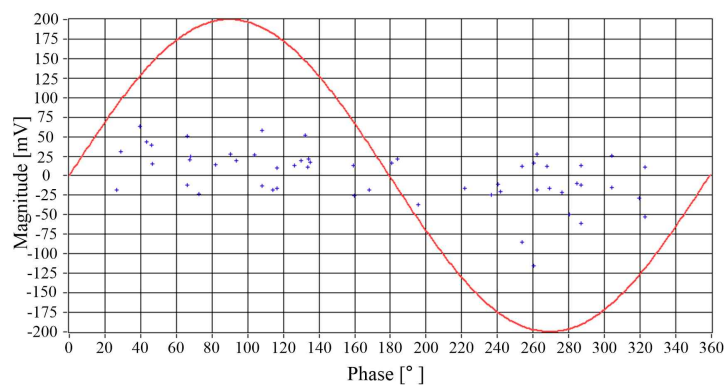
Table 4.4 Average pulse magnitude(at DIV)

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	23.1 mV	25.0 mV	25.4 mV	25.7 mV	25.2 mV
0.5 MPa	24.7 mV	24.4 mV	27.6 mV	26.4 mV	26.7 mV

그림 4.7과 그림 4.8은 방전개시전압에서 가스 혼합비율에 따른 압력별 부분방전 위상분포를 나타낸 것이다. 파티클의 운동으로 인하여 부분방전 펄스가 간헐적으로 발생하였으며, 압력 및 가스 혼합비율과 상관없이 전 위상에 걸쳐 부분방전 펄스가 분포하였다. 모든 혼합비, 압력에서 펄스 수는 80개 정도 발생하였다. 표 4.5는 압력별 혼합 가스비율에 따른 전체 펄스 수 대비 정·부극성 펄스 수를 나타낸 것이다. 앞서 말했듯이 부분방전 펄스가 전 위상에서 분포하였으며, 극성비는 양극성에서 비슷하게 나타났다.

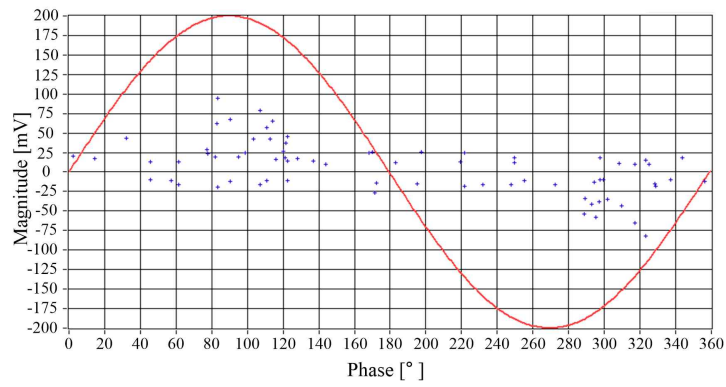


(a) SF<sub>6</sub> 100%

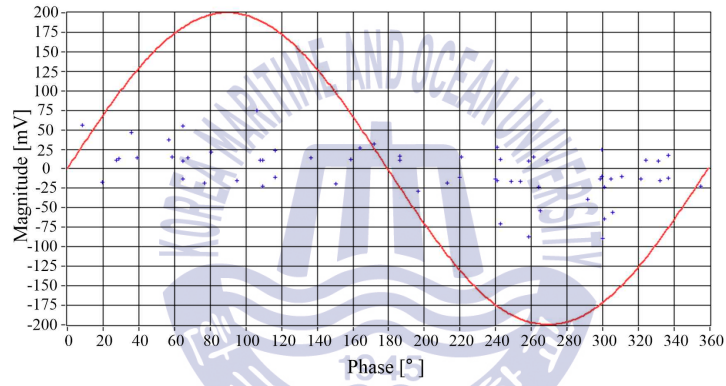


(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%

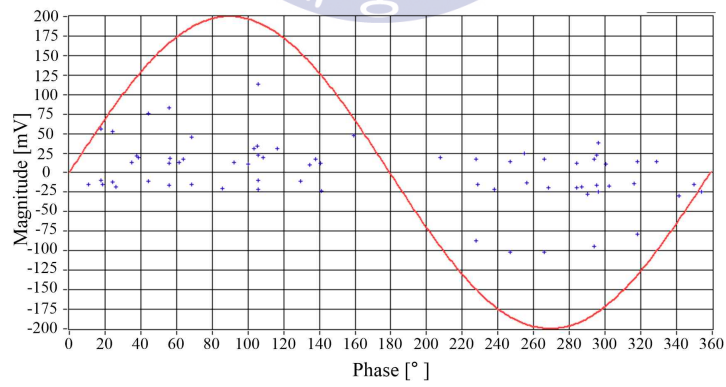




(c) SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%



(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%

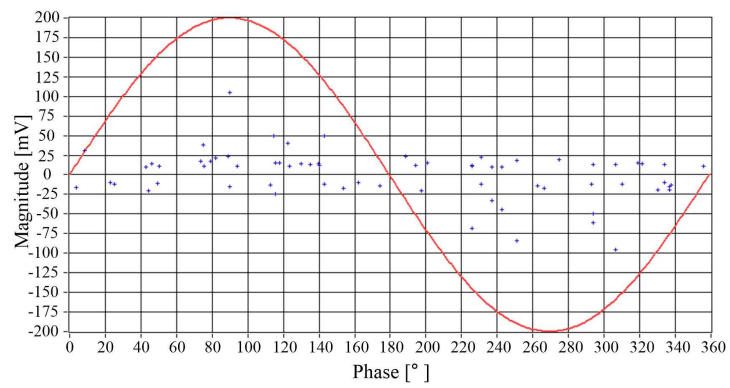


(e) N<sub>2</sub> 100%

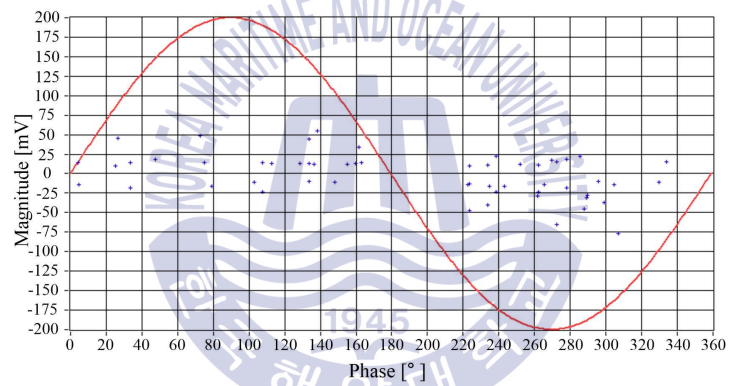
그림 4.7 위상분포(0.4 MPa)

Fig. 4.7 Phase distribution(at 0.4 MPa)

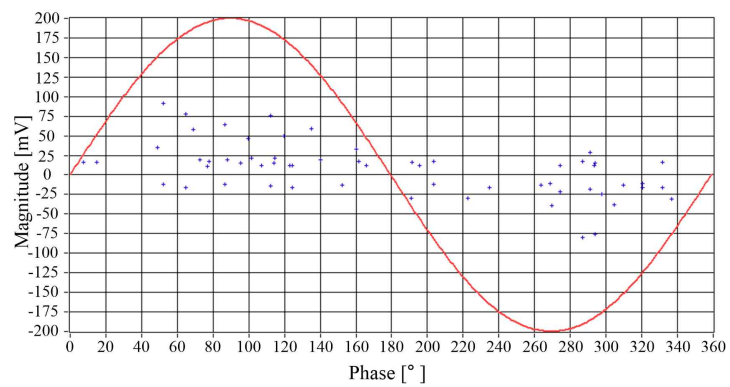




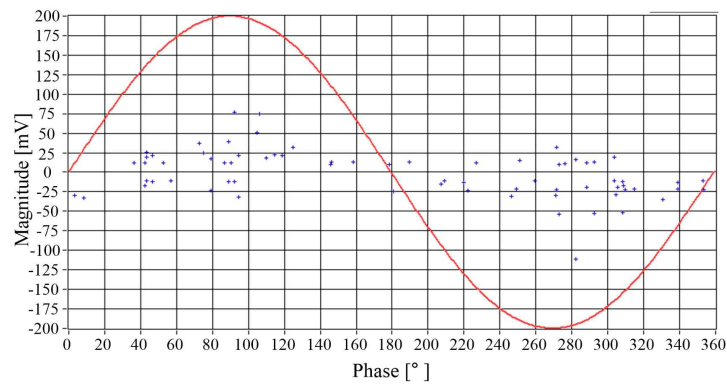
(a)  $\text{SF}_6$  100%



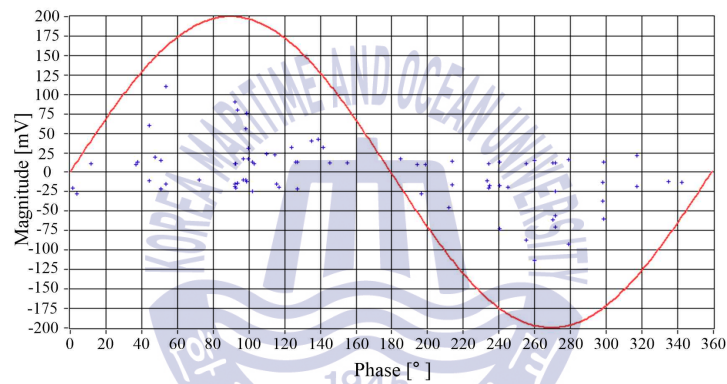
(b)  $\text{SF}_6$  80% -  $\text{N}_2$  20%



(c)  $\text{SF}_6$  50% -  $\text{N}_2$  50%



(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%



(e) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.8 위상분포(0.5 MPa)

Fig. 4.8 Phase distribution(at 0.5 MPa)

표 4.5 극성비(at DIV)

Table 4.5 Polarity ratio(at DIV)

구 분		SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	정극성	0.51	0.51	0.48	0.51	0.52
	부극성	0.49	0.49	0.52	0.49	0.48
0.5 MPa	정극성	0.53	0.51	0.54	0.49	0.53
	부극성	0.47	0.49	0.46	0.51	0.47

② 방전개시전압×1.25

그림 4.9와 그림 4.10은 최대 및 평균 펄스크기를 나타낸 것이다. 전체적으로 방전개시전압일 때보다 크기가 증가하였으나 0.4 MPa, SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%에서는 평균펄스크기가 방전개시전압일 때보다 감소하였다. 또한 SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%에서 최대 및 평균 펄스크기가 가장 작았으나, 0.5 MPa일 때 평균펄스크기는 최댓값이 나타났다. 0.4 MPa, N<sub>2</sub> 100%에서 최대펄스크기가 가장 크게 나타났으며, 이 때 SF<sub>6</sub> 100% 대비 증가율은 35%이다. 0.5 MPa일 때에는 SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서 최대펄스크기가 가장 증가하였으며, SF<sub>6</sub> 100% 대비 증가율은 11%이다. 평균펄스크기의 경우 0.5 MPa일 때, SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%에서 SF<sub>6</sub> 100% 대비 7% 감소로 가장 작았으며, 그 외에 혼합비율에서는 4% 미만의 변화로 모든 혼합비율에서 거의 동일하게 나타났다.

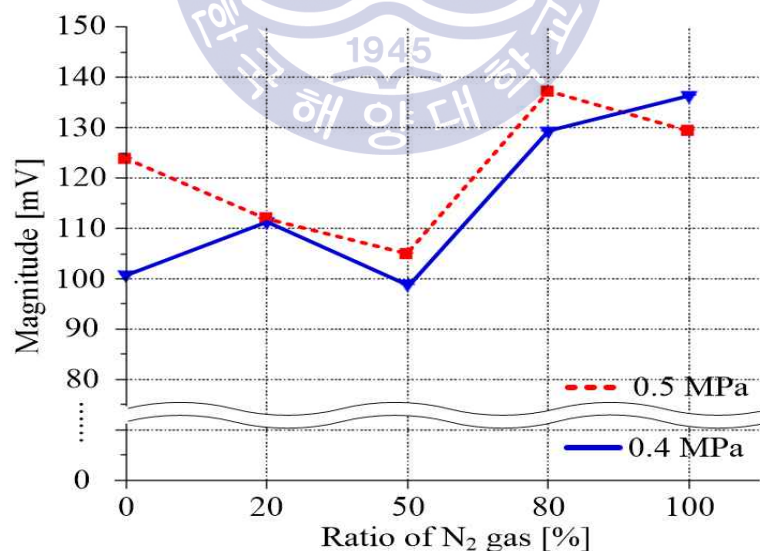


그림 4.9 최대펄스의 크기(at DIV×1.25)

Fig. 4.9 Maximum pulse magnitude(at DIV×1.25)

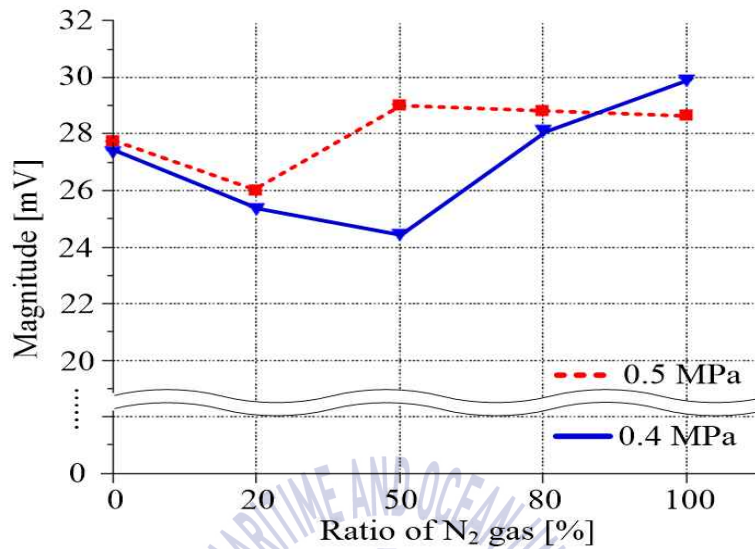


그림 4.10 평균펄스의 크기(at DIV×1.25)

Fig. 4.10 Average pulse magnitude(at DIV×1.25)

표 4.6과 표 4.7은 최대 및 평균 펄스 크기를 정리한 것이다. 최대 펄스 크기의 경우 0.4 MPa일 때, SF<sub>6</sub> 100% 대비 SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%는 감소, 그 외에 SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80% 및 N<sub>2</sub> 100%는 각각 11%, 28% 및 35% 증가하였다. 0.5 MPa일 때는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%와 SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%에서 각각 11% 및 15% 감소하였으며, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80% 및 N<sub>2</sub> 100%에서는 11% 및 4% 증가하였다. SF<sub>6</sub> 100%에서 압력에 따른 변화가 가장 크게 나타났으며, 그 외 혼합비율에서는 거의 동일하였다.

평균 펄스 크기는 N<sub>2</sub>의 비율이 50% 이하일 때는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 감소하다가, 80% 이상이 되자 증가하였다. 0.5 MPa일 때는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%에서 7% 감소하였으며, 그 외 혼합비율에서는 변화가 4% 미만으로 거의 동일하였다.

표 4.6 최대펄스의 크기(at DIV×1.25)

Table 4.6 Maximum pulse magnitude(at DIV×1.25)

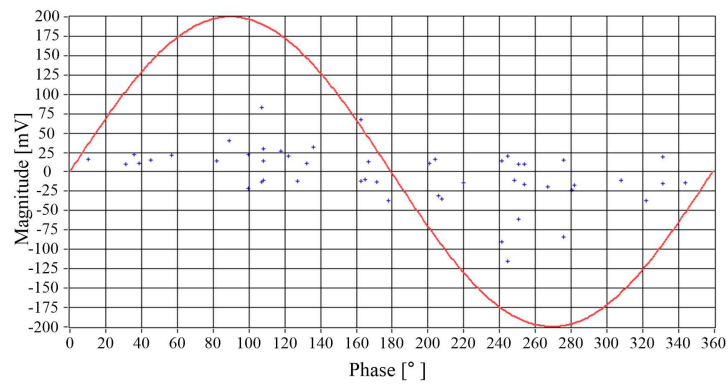
구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	100.8 mV	111.4 mV	99.0 mV	129.4 mV	136.5 mV
0.5 MPa	124.0 mV	110.1 mV	105.1 mV	137.3 mV	129.5 mV

표 4.7 평균펄스의 크기(at DIV×1.25)

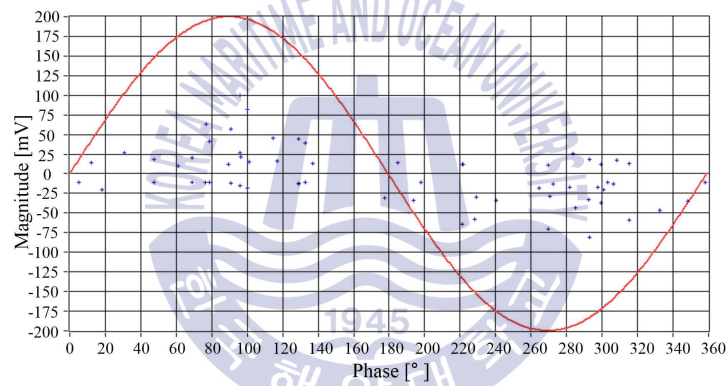
Table 4.7 Average pulse magnitude(at DIV×1.25)

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	27.4 mV	25.4 mV	24.5 mV	28.2 mV	30.0 mV
0.5 MPa	27.8 mV	26.0 mV	29.0 mV	28.8 mV	28.7 mV

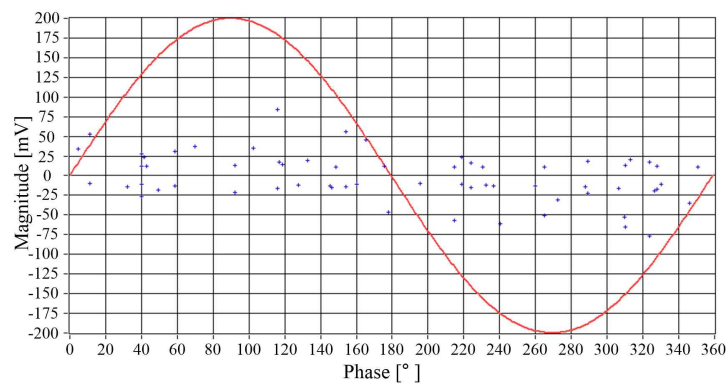
그림 4.11과 그림 4.12는 방전개시전압×1.25에서의 가스 혼합비율에 따른 압력별 부분방전위상을 측정한 것이다. 방전개시전압과 마찬가지로 전위상에서 부분방전펄스가 분포하였다. 정·부극성 비율도 압력과 가스 혼합비율에 영향을 받지 않았으며, 양극성에서 유사하게 나타났다. 가스 혼합비율에 따른 극성비를 표 4.8에 나타내었다. 부분방전은 간헐적으로 발생하였으며, 펄스크기는 방전개시전압보다 크게 나타났다. 펄스 수는 N<sub>2</sub> 100%(0.5 MPa)에서 최대 110개가 나타났으며, 그 외에는 모두 80개 정도로 방전개시전압과 비슷하였다.



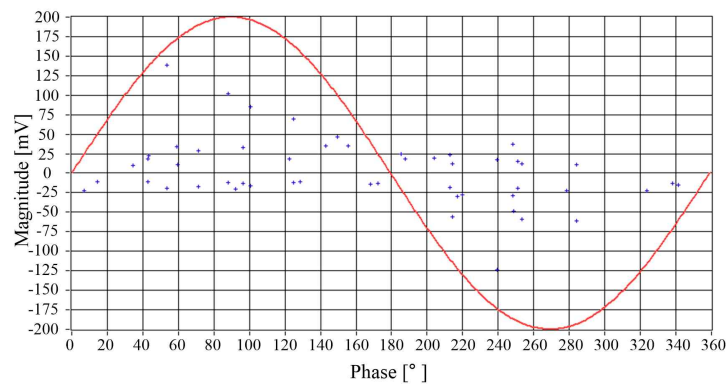
(a) SF<sub>6</sub> 100%



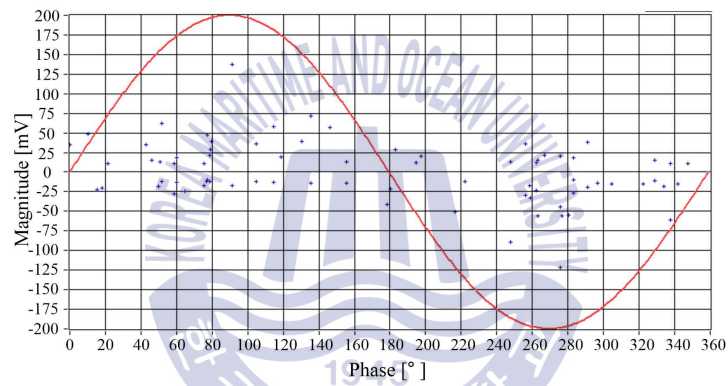
(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%



(c) SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%



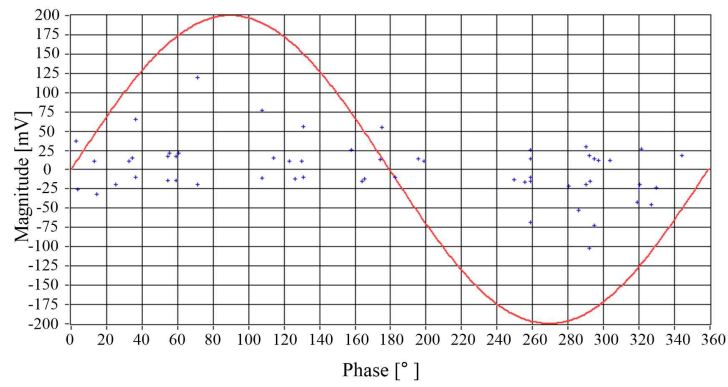
(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%



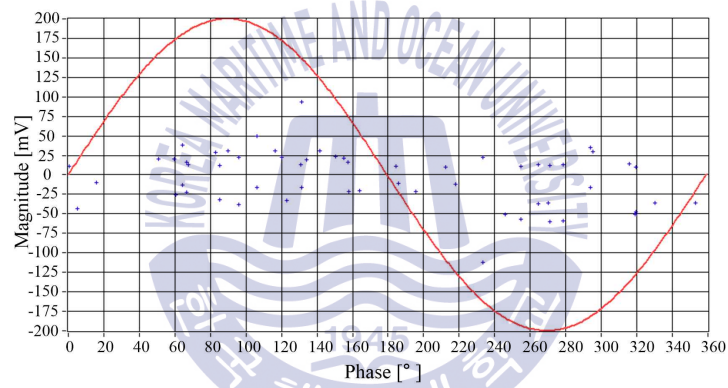
(e) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.11 위상분포(0.4 MPa)

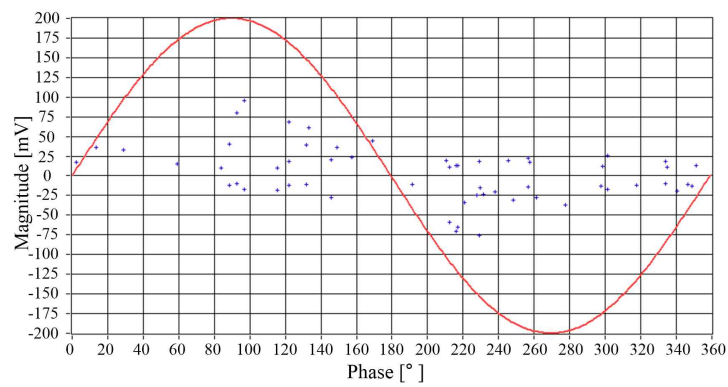
Fig. 4.11 Phase distribution(at 0.4 MPa)



(a) SF<sub>6</sub> 100%

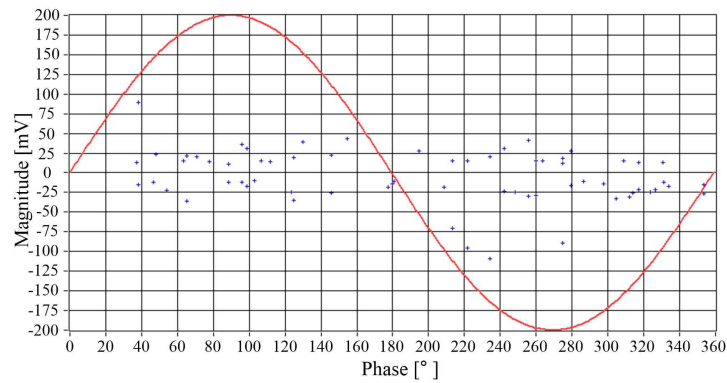


(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%

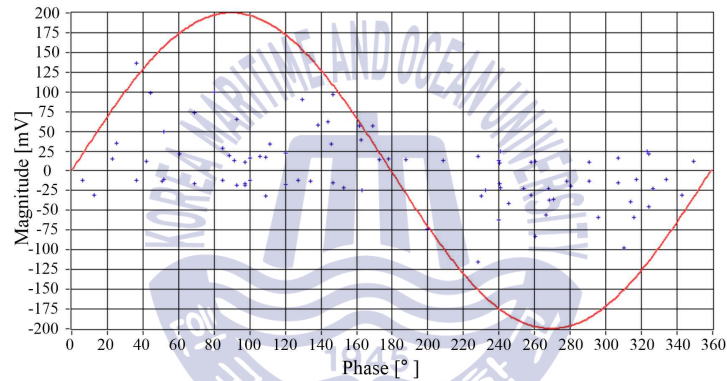


(c) SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%





(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%



(e) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.12 위상분포(0.5 MPa)

Fig. 4.12 Phase distribution(at 0.5 MPa)

표 4.8 극성비(at DIV×1.25)

Table 4.8 Polarity ratio(at DIV×1.25)

구 분		SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	정극성	0.48	0.53	0.48	0.52	0.49
	부극성	0.52	0.47	0.52	0.48	0.51
0.5 MPa	정극성	0.51	0.53	0.53	0.49	0.49
	부극성	0.49	0.47	0.47	0.51	0.51

## 나. 도체 돌출

### ① 방전개시전압

그림 4.13과 그림 4.14는 도체 돌출에서의 혼합 가스비율별 방전 개시 및 소멸 전압을 나타낸 것으로,  $N_2$  비율이 증가할수록 감소하는 경향이있다.  $N_2$  100%의 경우  $SF_6$  100% 대비 70% 정도 감소하였다. 이러한 경향은 0.4 MPa와 0.5 MPa에서 동일하게 나타났다. 방전개시전압이 방전소멸전압보다 항상 높게 나타났다.

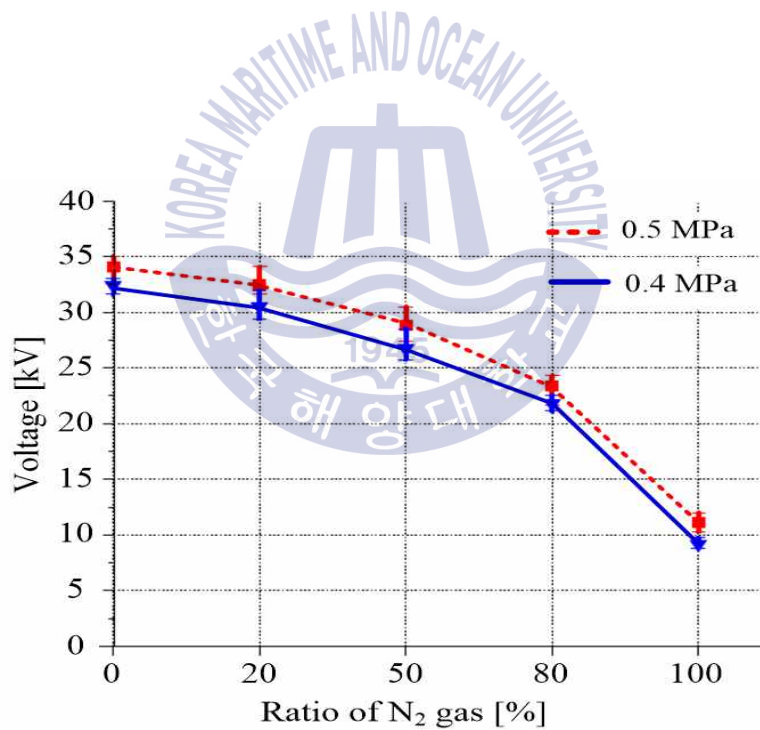


그림 4.13 방전개시전압

Fig. 4.13 Discharge inception voltage

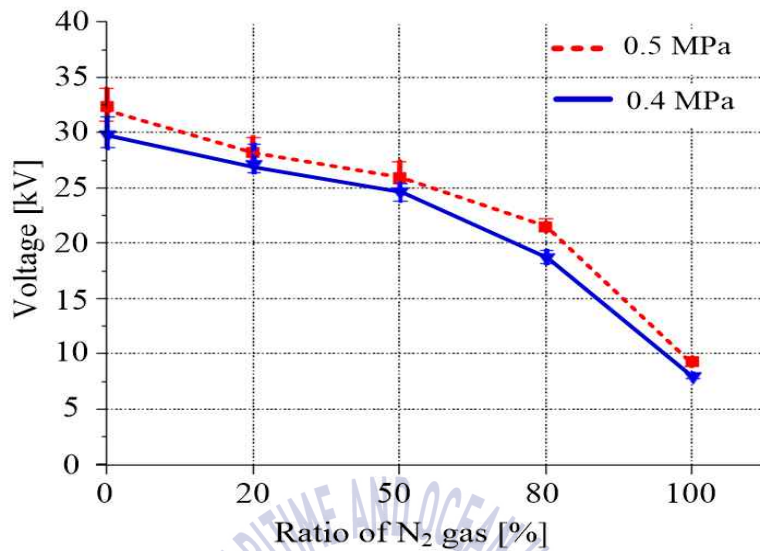


그림 4.14 방전소멸전압

Fig. 4.14 Discharge extinction voltage

표 4.9와 표 4.10은 방전 개시 및 소멸 전압의 평균값을 정리한 것으로 0.4 MPa일 때 방전개시전압의 경우 SF<sub>6</sub> 100%가 제일 높은 32.4 kV이었으며, N<sub>2</sub>의 비율이 증가할수록 각각 6%, 18%, 33% 및 72% 감소하였다. 0.5 MPa일 때, SF<sub>6</sub> 100%는 방전개시전압이 5% 증가하였으며, SF<sub>6</sub> 100% 대비 가스 혼합비에 따른 증가율은 0.4 MPa일 때와 동일하였다.

방전소멸전압은 방전개시전압보다 낮게 나타났다. SF<sub>6</sub> 100% 대비 N<sub>2</sub>의 비율에 따른 감소율이 방전개시전압보다 높았으며, 이는 압력이 증가할수록 더 많은 차이를 보였다. N<sub>2</sub> 100%의 방전소멸전압은 0.4 MPa와 0.5 MPa에서 각각 SF<sub>6</sub> 100% 대비 25%, 29%에 불과하였으며 SF<sub>6</sub>가 20%만 혼합되어도 방전 개시 및 소멸 전압이 2배 이상으로 높아졌다.

표 4.9 방전개시전압

Table 4.9 Discharge inception voltage

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	32.4 kV	30.5 kV	26.7 kV	21.8 kV	9.2 kV
0.5 MPa	34.1 kV	32.5 kV	28.8 kV	23.4 kV	11.1 kV

표 4.10 방전소멸전압

Table 4.10 Discharge extinction voltage

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	29.8 kV	27.1 kV	24.7 kV	18.7 kV	8.0 kV
0.5 MPa	32.4 kV	28.2 kV	26.0 kV	20.7 kV	9.4 kV

방전개시전압에서의 최대 및 평균 펄스크기를 그림 4.15와 그림 4.16에 나타내었으며, 각각을 표 4.11과 표 4.12에 정리하였다. 대체로 N<sub>2</sub> 비율이 증가함에 따라 펄스크기가 감소하였으며, 0.4 MPa 일 때보다 0.5 MPa 일 때의 최대 및 평균 펄스크기가 증가하였다. 0.5 MPa일 때 최대 및 평균 펄스크기의 감소율이 0.4 MPa일 때보다 크게 나타났다. 특히 0.4 MPa에서의 평균펄스크기는 N<sub>2</sub>의 비율이 50% 이상일 때는 거의 동일하였으며, SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%에서 SF<sub>6</sub> 100% 대비 14%로 감소로 가장 낮았다.

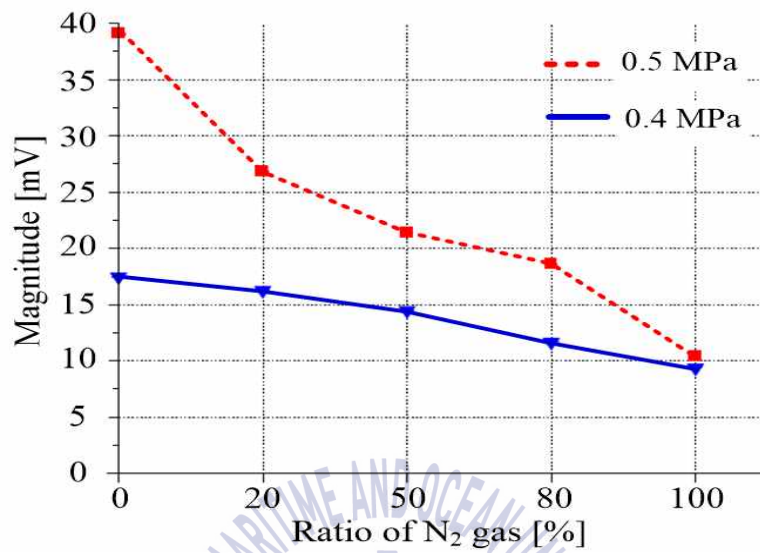


그림 4.15 최대펄스의 크기(at DIV)

Fig. 4.15 Maximum pulse magnitude(at DIV)

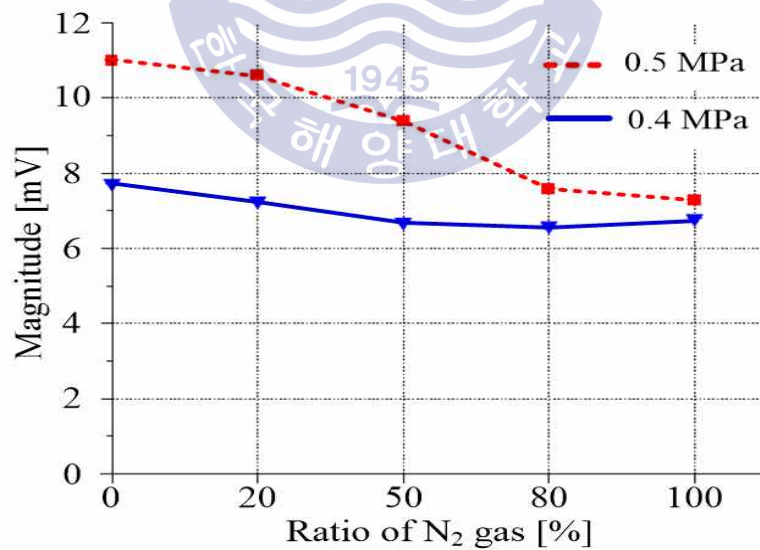


그림 4.16 평균펄스의 크기(at DIV)

Fig. 4.16 Average pulse magnitude(at DIV)

SF<sub>6</sub>의 경우 0.5 MPa에서의 최대펄스크기가 0.4 MPa일 때보다 2.2배 정도 높았으며, SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%, SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%와 N<sub>2</sub> 100%에서도 동일한 경향이였다. 또한 SF<sub>6</sub> 100% 대비 펄스크기의 감소율은 0.4 MPa일 때보다 0.5 MPa일 때에 더욱 증가하였다.

0.4 MPa에서 평균펄스크기는 SF<sub>6</sub> 100%에서 7.7 mV로 제일 높았으며, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서 가장 낮았으며, 이 때 SF<sub>6</sub> 100% 대비 감소율은 14%이다. 0.5 MPa일 때 평균펄스크기가 전체적으로 증가하였으며, SF<sub>6</sub> 100%에서 최댓값이, N<sub>2</sub> 100%에서 최솟값이 나타났다. 이때 SF<sub>6</sub> 100% 대비 N<sub>2</sub> 100%의 감소율은 34%이다.

표 4.11 최대펄스의 크기(at DIV)

Table 4.11 Maximum pulse magnitude(at DIV)

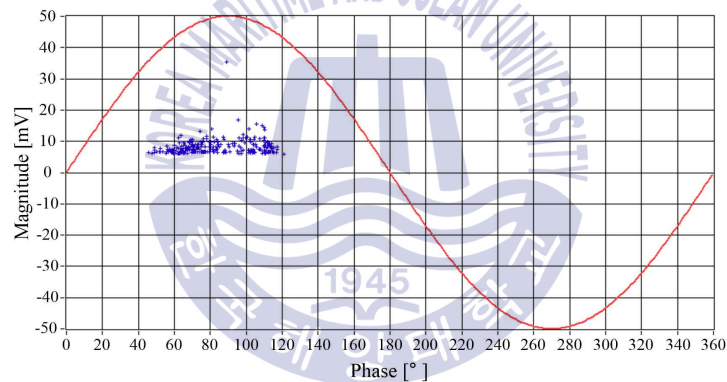
구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	17.5 mV	16.3 mV	14.5 mV	11.7 mV	9.4 mV
0.5 MPa	39.2 mV	26.9 mV	21.5 mV	18.7 mV	10.5 mV

표 4.12 평균펄스의 크기(at DIV)

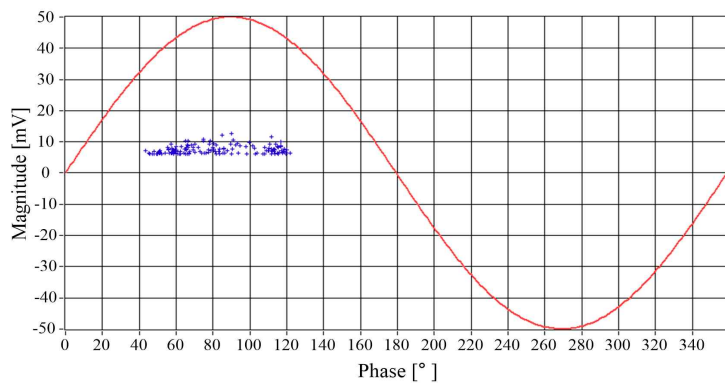
Table 4.12 Average pulse magnitude(at DIV)

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	7.7 mV	7.3 mV	6.7 mV	6.6 mV	6.8 mV
0.5 MPa	11.0 mV	10.6 mV	9.4 mV	7.6 mV	7.3 mV

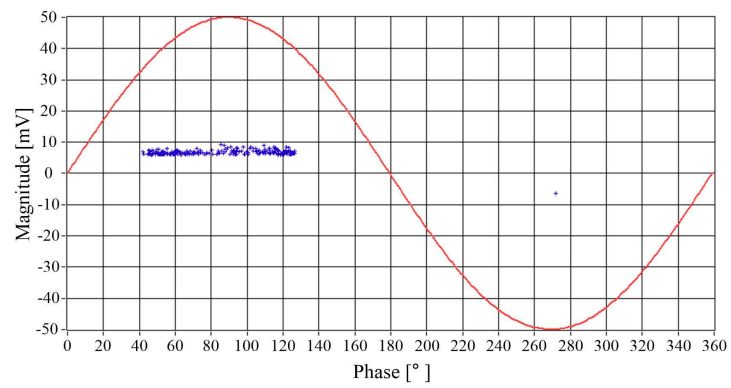
다음은 방전개시전압에서의 가스 혼합비율별 부분방전위상을 나타낸 것으로 그림 4.17은 0.4 MPa, 그림 4.18은 0.5 MPa일 때이다. N<sub>2</sub> 100%에서는 전체 펄스의 95% 이상이 부극성에서 발생하였으며, 위상은 230°~310°이었다. 그러나 SF<sub>6</sub>의 비율이 20% 이상이 되자 정극성인 40°~130°에서 전체 펄스의 95%이상이 분포하였다. N<sub>2</sub> 100%일 때는 0.4 MPa과 0.5 MPa 전체 펄스의 95%이상이 부극성에서, 그 외 가스에서는 반대인 정극성에서 발생함을 알 수 있었다. 펄스 수는 0.4 MPa일 때, 모든 혼합비에서 80개에서 최대 200개 정도에 불과하였으나, 0.5 MPa에서는 모두 400개를 넘게 발생하였으며 N<sub>2</sub> 100%에서 최대 1,500개가 발생하였다.



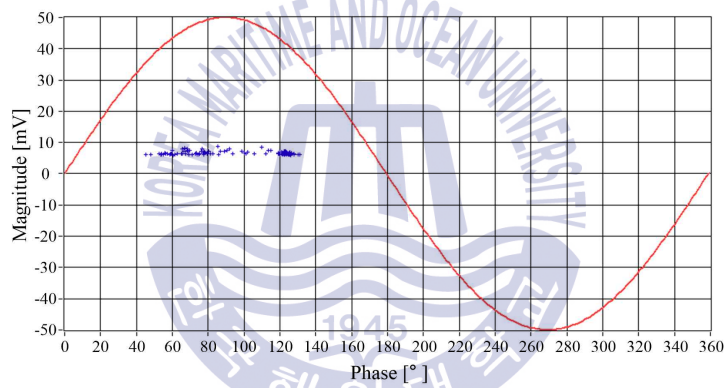
(a) SF<sub>6</sub> 100%



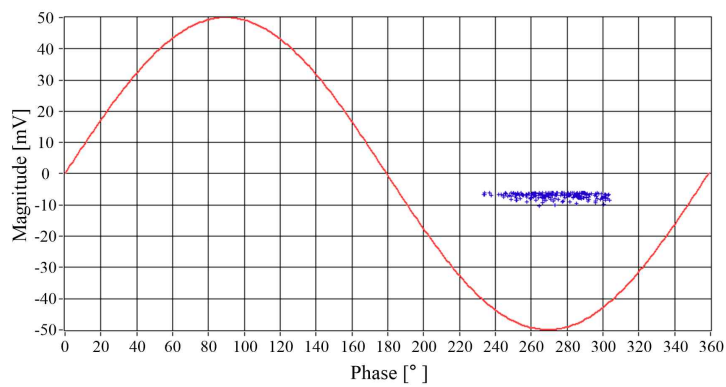
(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%



(c) SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%



(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%

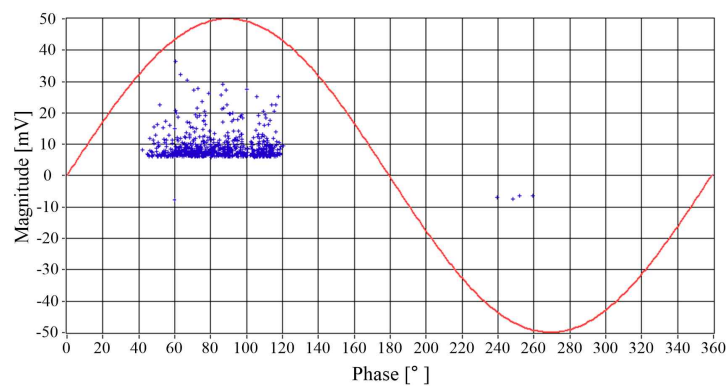


(e) N<sub>2</sub> 100%

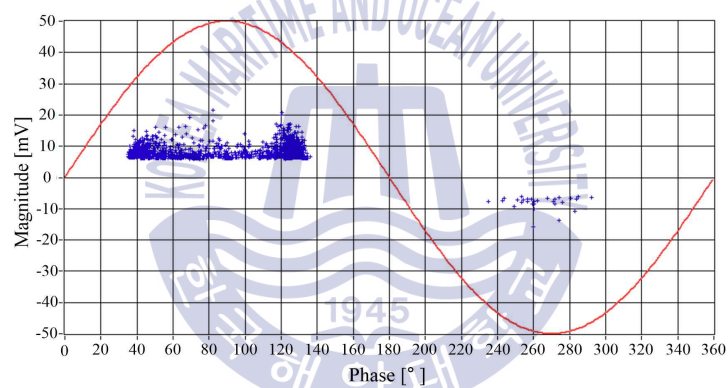
그림 4.17 위상분포(0.4 MPa)

Fig. 4.17 Phase distribution(at 0.4 MPa)

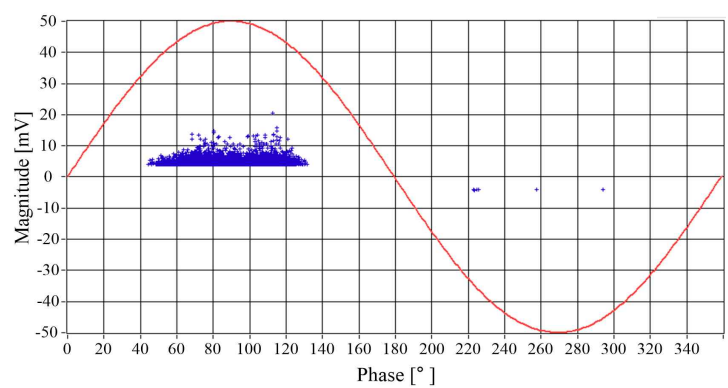




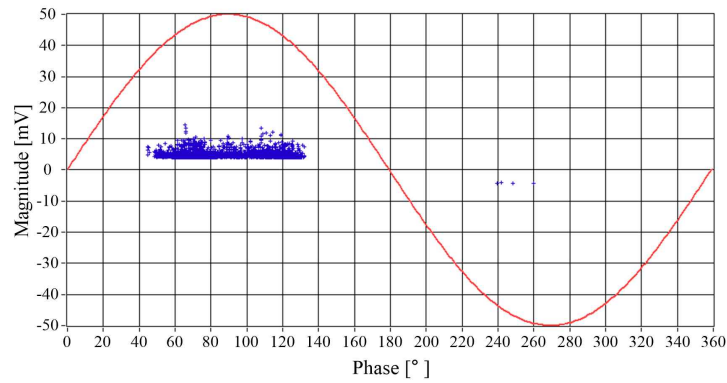
(a) SF<sub>6</sub> 100%



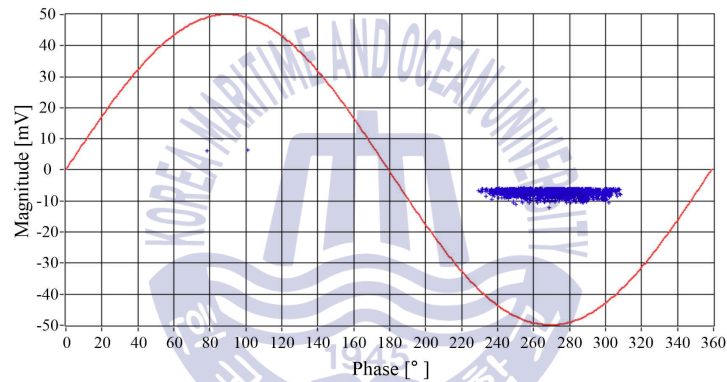
(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%



(c) SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%



(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%



(e) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.18 위상분포(0.5 MPa)

Fig. 4.18 Phase distribution(at 0.5 MPa)

표 4.13 극성비(at DIV)

Table 4.13 Polarity ratio(at DIV)

구 분		SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	정극성	1	0.98	0.97	0.99	0.02
	부극성	0	0.02	0.03	0.01	0.98
0.5 MPa	정극성	1	0.99	0.99	0.98	0.05
	부극성	0	0.01	0.01	0.02	0.95

② 방전개시전압×1.25

방전개시전압×1.25에서 발생한 최대 및 평균 펄스크기는 그림 4.19 및 그림 4.20과 같으며, 이를 표 4.14와 표 4.15에 정리하였다. N<sub>2</sub>의 비율이 증가할수록 펄스크기가 감소하였으며, 이는 방전개시전압일 때와 동일한 경향이였다. 또한 0.4 MPa일 때보다 0.5 MPa일 때 최대 및 평균 펄스크기가 증가하였다.

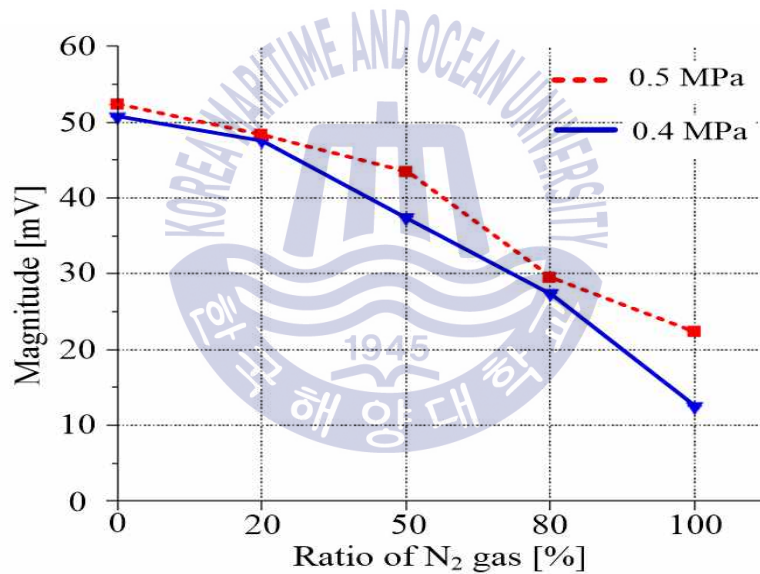


그림 4.19 최대펄스의 크기(at DIV×1.25)

Fig. 4.19 Maximum pulse magnitude(at DIV×1.25)

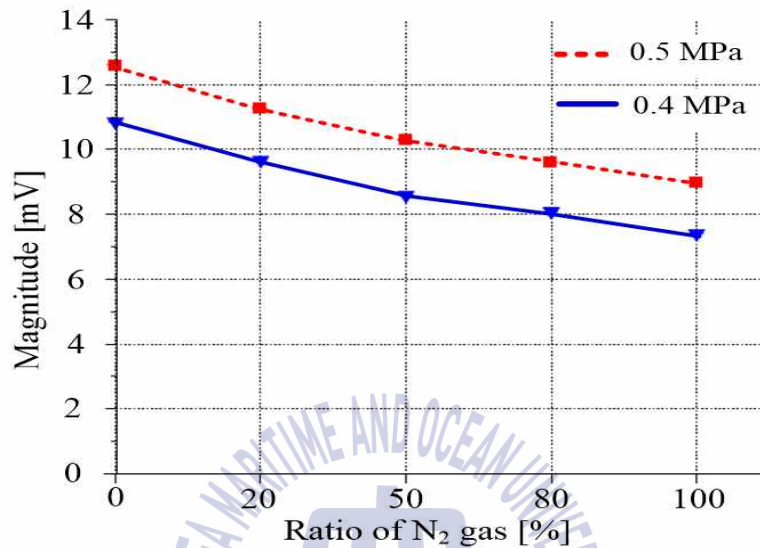


그림 4.20 평균펄스의 크기(at DIV×1.25)

Fig. 4.20 Average pulse magnitude(at DIV×1.25)

최대펄스크기와 평균펄스크기는 표 4.14와 표 4.15와 같으며 방전개시전압 때와 마찬가지로 압력이 높을수록, SF<sub>6</sub> 비율이 증가할수록 크게 나타났다. 0.4 MPa, N<sub>2</sub> 100%는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 최대펄스크기가 24%밖에 되지 않았는데, 이는 방전개시전압이 매우 낮아서 방전내량이 작기 때문이라 판단된다.

0.5 MPa일 때의 평균펄스크기가 0.4 MPa일 때보다 높게 나타났으나, 압력에 따른 감소율은 동일하였다. 평균펄스크기도 SF<sub>6</sub> 100%가 제일 크게 나타났으며, N<sub>2</sub> 100%가 가장 작았다.

표 4.14 최대펄스의 크기(at DIV×1.25)

Table 4.14 Maximum pulse magnitude(at DIV×1.25)

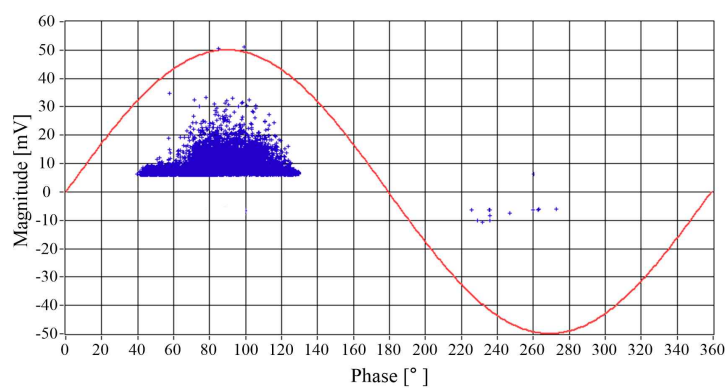
구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	50.7 mV	47.6 mV	37.4 mV	27.4 mV	12.5 mV
0.5 MPa	52.3 mV	48.3 mV	43.5 mV	29.5 mV	22.4 mV

표 4.15 평균펄스의 크기(at DIV×1.25)

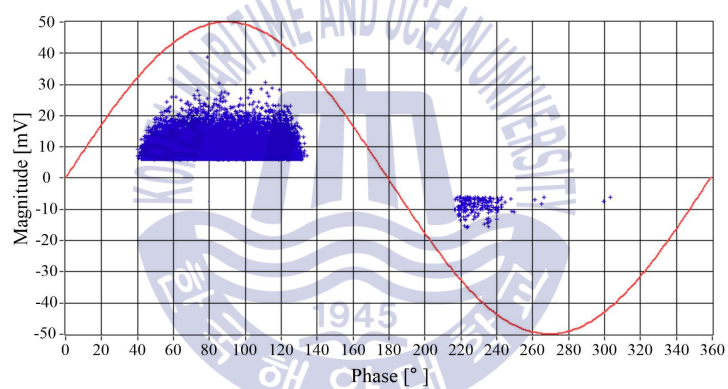
Table 4.15 Average pulse magnitude(at DIV×1.25)

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	10.7 mV	9.7 mV	8.6 mV	8.1 mV	7.4 mV
0.5 MPa	12.6 mV	11.3 mV	10.3 mV	9.6 mV	9.0 mV

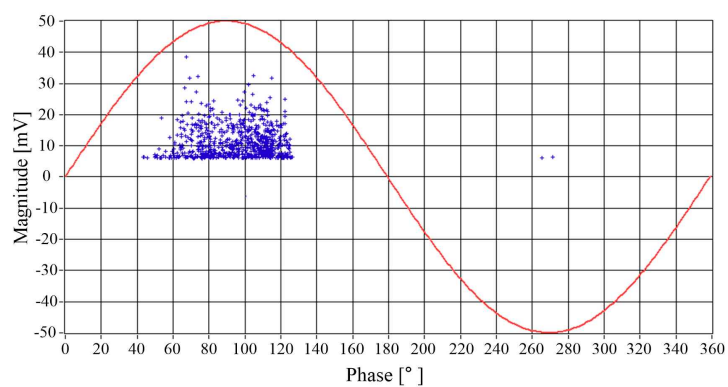
방전개시전압에서 1.25배 증가시킨 전압에서의 부분방전위상, 정·부극성 비율 및 최대 및 평균 펄스크기를 측정하였다. 그림 4.21과 그림 4.22에 압력에 따른 부분방전펄스의 위상분포를 나타내었다. 방전개시전압과 달리 N<sub>2</sub> 100%에서도 부분방전펄스의 90%이상이 정극성에서 분포하였으며, 극성비를 표 4.16에 정리하였다. 펄스 수의 경우 0.4 MPa일 때는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%는 동일하였으며, SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50% 및 N<sub>2</sub> 100%는 2.8배, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서는 8배 증가하였다. 0.4 MPa일 때는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%는 동일, SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50% 및 F<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%는 1.6배, N<sub>2</sub> 100%에서는 2.8배 증가하였다.



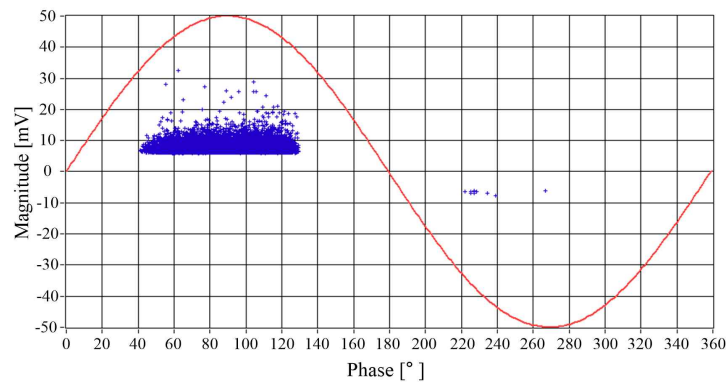
(a) SF<sub>6</sub> 100%



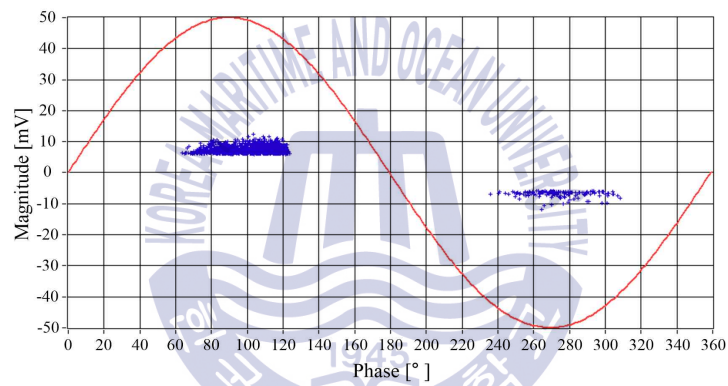
(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%



(c) SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%



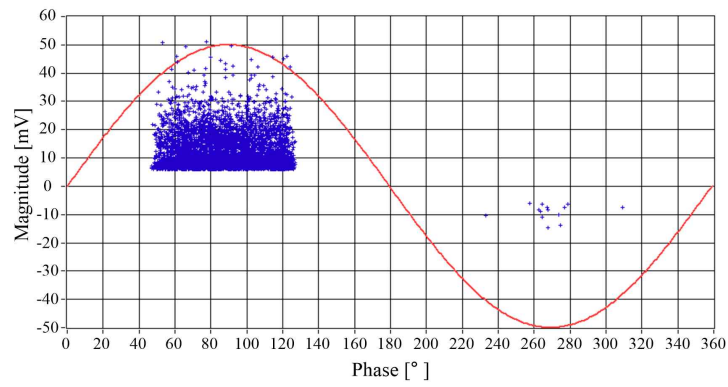
(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%



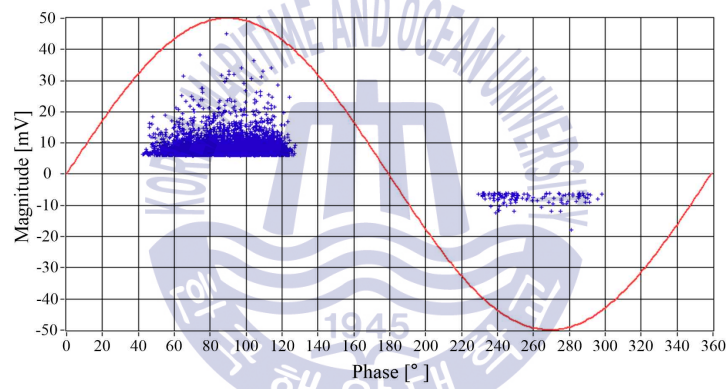
(e) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.21 위상분포(0.4 MPa)

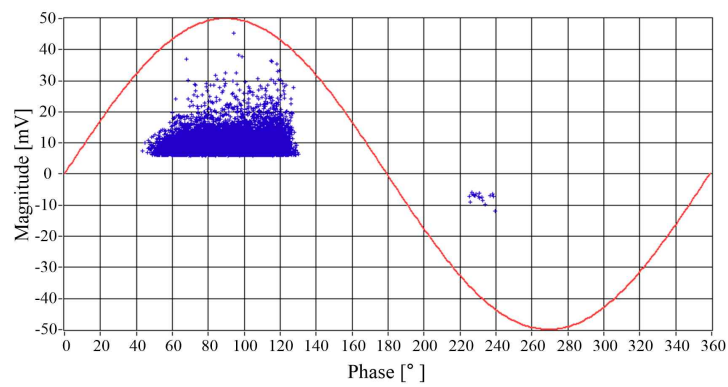
Fig. 4.21 Phase distribution(at 0.4 MPa)



(a) SF<sub>6</sub> 100%

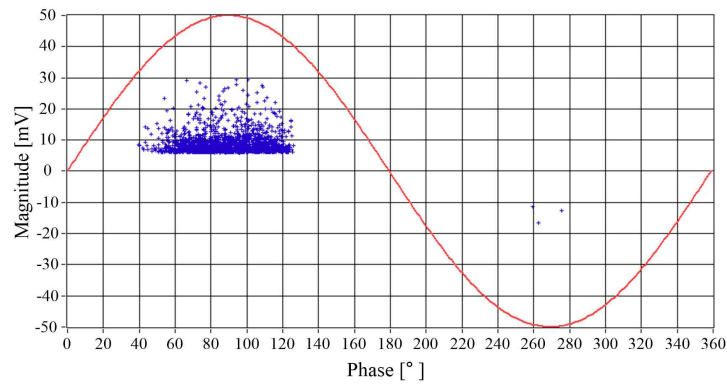


(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%

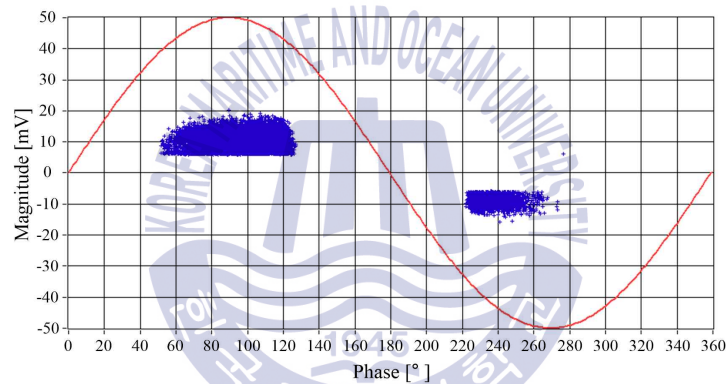


(c) SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%





(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%



(e) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.22 위상분포(0.5 MPa)

Fig. 4.22 Phase distribution(at 0.5 MPa)

표 4.16 극성비(at DIV×1.25)

Table 4.16 Polarity ratio(at DIV×1.25)

구 분		SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	정극성	0.99	1	0.99	0.98	0.90
	부극성	0.01	0	0.01	0.02	0.10
0.5 MPa	정극성	1	1	1	0.98	0.92
	부극성	0	0	0	0.02	0.08

#### 다. 외함 돌출

마지막으로 외함 돌출의 부분방전 특성에 대해서 분석하였다.

##### ① 방전개시전압

방전 개시 및 소멸 전압은 각각 그림 4.23 및 그림 4.24와 같다.  $N_2$ 의 비율이 증가하여 50%가 될 때까지는 방전 개시 및 소멸 전압이  $SF_6$  100%일 때와 동일하였다. 그러나  $N_2$ 의 비율이 80% 이상이 되자, 급격하게 감소하였으며,  $N_2$  100%의 경우  $SF_6$  100%의 35%정도에 불과하였다. 또한 다른 결함들에 비해서 동일한 조건에서는 방전 개시 및 소멸 전압의 범위가 매우 작았다. 즉, 동일한 압력 및 가스비율에서는 방전 개시 및 소멸 전압의 최댓값과 최솟값 차이가 없었다.

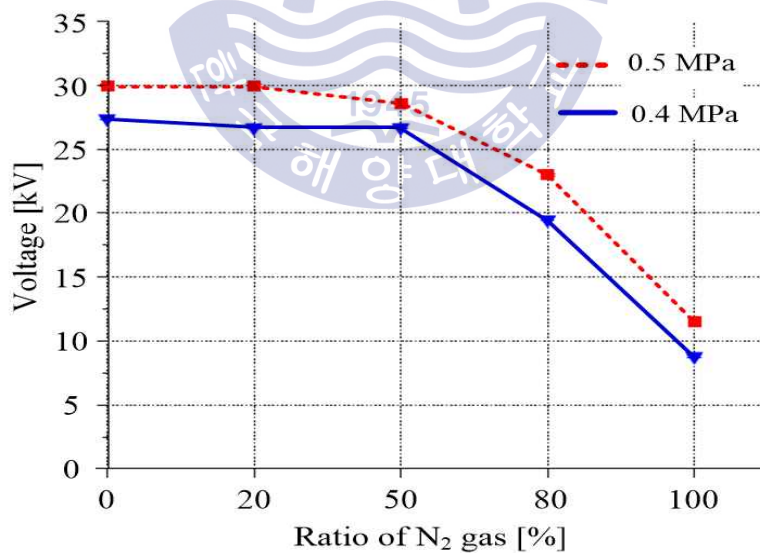


그림 4.23 방전개시전압

Fig. 4.23 Discharge inception voltage

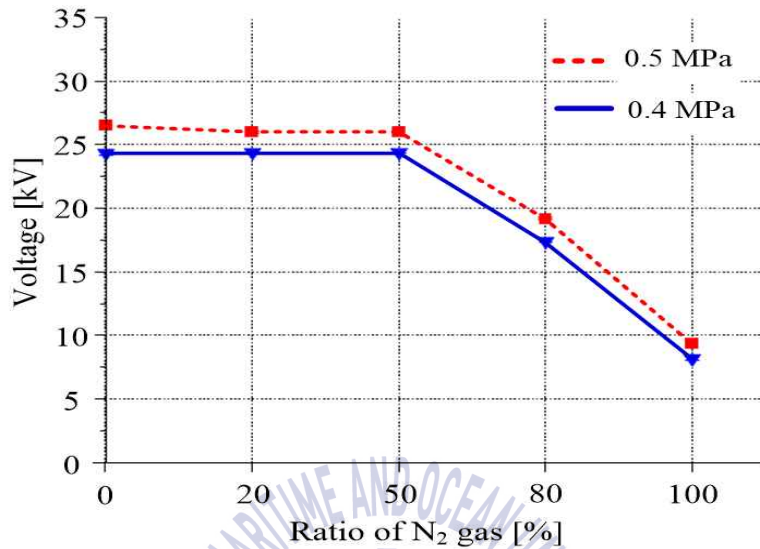


그림 4.24 방전소멸전압

Fig. 4.24 Discharge extinction voltage

0.4 MPa, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%와 N<sub>2</sub> 100%에서의 방전소멸전압은 각각 SF<sub>6</sub> 100% 대비 26% 및 65%가 감소하였으며, 0.5 MPa, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%와 N<sub>2</sub> 100%의 경우도 각각 28%와 65%로 감소율이 비슷하였다.

외함 돌출은 다른 결함들에 비해서 동일한 혼합비 및 압력 내에서 방전 개시전압의 범위가 매우 좁고 동일한 전압에서 방전이 발생하였다.

표 4.17 방전개시전압

Table 4.17 Discharge inception voltage

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	27.4 kV	26.7 kV	26.7 kV	19.5 kV	8.8 kV
0.5 MPa	30.1 kV	30.0 kV	28.6 kV	23.0 kV	11.5 kV

표 4.18 방전소멸전압

Table 4.18 Discharge extinction voltage

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	23.7 kV	24.5 kV	24.5 kV	17.5 kV	8.3 kV
0.5 MPa	26.5 kV	26.2 kV	26.0 kV	19.2 kV	9.4 kV

그림 4.25와 그림 4.26은 최대 및 평균 펄스크기를 나타낸 것이다. 압력이 높을수록 증가하였으며, 압력별 경향은 비슷했다. SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%일 때 펄스크기가 가장 작았으며, 대체적으로 SF<sub>6</sub> 100%에서 최댓값이 나타났다. 평균펄스는 SF<sub>6</sub> 100%가 가장 높았으며, 그 외 혼합비율에서는 거의 동일하였다.

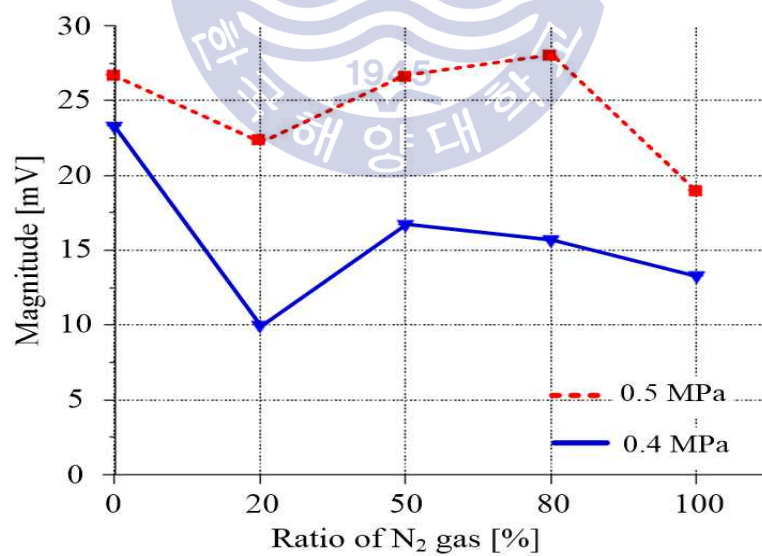


그림 4.25 최대펄스의 크기(at DIV)

Fig. 4.25 Maximum pulse magnitude(at DIV)

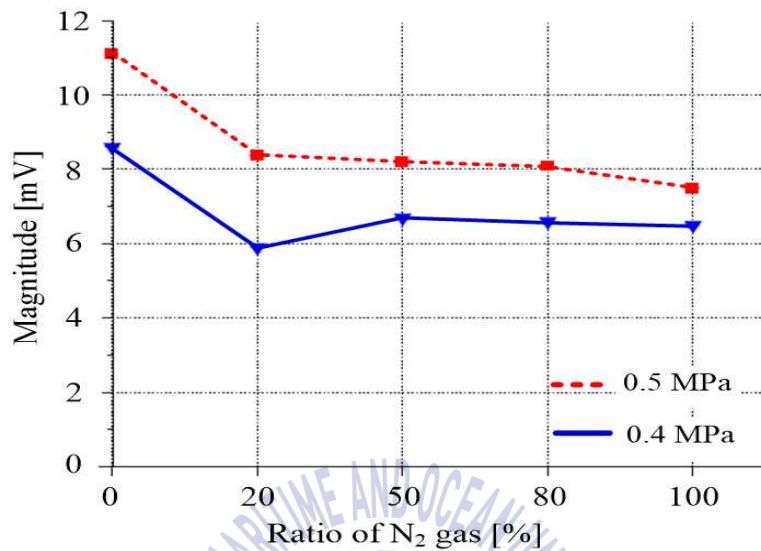


그림 4.26 평균펄스의 크기(at DIV)

Fig. 4.26 Average pulse magnitude(at DIV)

외함 돌출의 경우 초기에는 방전크기가 미소하여 검출이 어렵지만, 한번 발생하면 신호가 크게 나타났다. 0.4 MPa, SF<sub>6</sub> 100%에서의 최대펄스크기는 23.3 mV로 가장 크게 나타났으며, SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%, SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80% 및 N<sub>2</sub> 100%는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 57%, 28%, 33% 및 43% 감소하였다. 압력을 증가시키자 최대펄스크기는 SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서 가장 크게 나타났다. 0.4 MPa와 달리 SF<sub>6</sub> 100%일 때의 최대펄스크기보다 SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%가 5% 가량 증가하였으며, 그 외에는 SF<sub>6</sub> 100%보다 감소하였다.

평균펄스크기는 모든 압력에서 SF<sub>6</sub> 100%일 때가 가장 컸으며, 0.4 MPa일 때에는 SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%에서, 0.5 MPa일 때에는 N<sub>2</sub> 100%에서 가장 많이 감소하였다.

표 4.19 최대펄스의 크기(at DIV)

Table 4.19 Maximum pulse magnitude(at DIV)

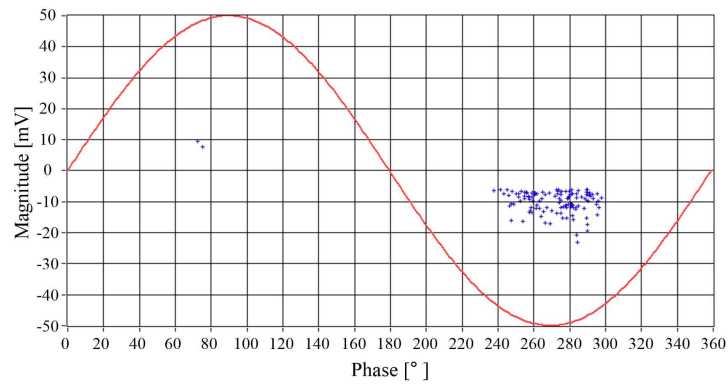
구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	23.3 mV	10.0 mV	16.7 mV	15.7 mV	13.3 mV
0.5 MPa	26.7 mV	22.4 mV	26.6 mV	28.0 mV	19.0 mV

표 4.20 평균펄스의 크기(at DIV)

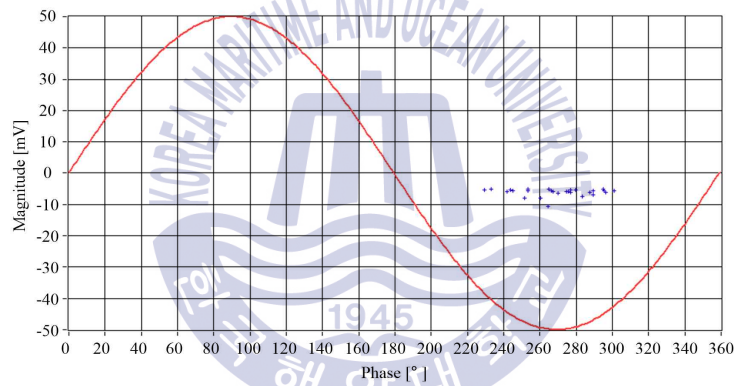
Table 4.20 Average pulse magnitude(at DIV)

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	8.6 mV	5.9 mV	6.7 mV	6.6 mV	6.5 mV
0.5 MPa	11.1 mV	8.4 mV	8.2 mV	8.1 mV	7.5 mV

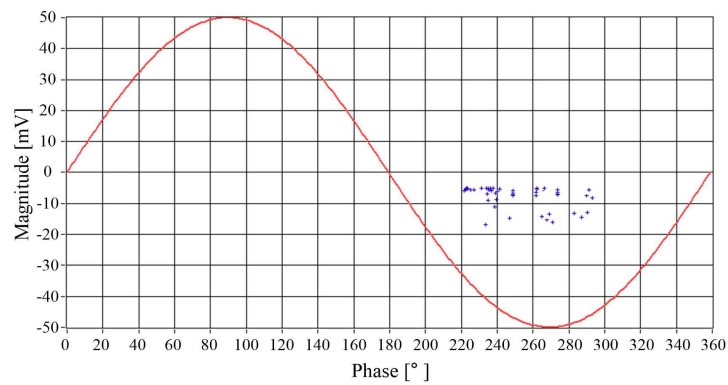
다음 그림 4.27과 그림 4.28은 가스 혼합비율에 따른 부분방전의 위상을 나타낸 것이다. 도체 돌출과 반대의 경향을 나타내었다. N<sub>2</sub> 100%일 때는 부분방전펄스의 95% 이상이 정극성에서 발생하였으며, 이 때의 위상은 60°~120°이었다. 마찬가지로 SF<sub>6</sub>가 혼합되자 230°~300°의 부극성에서 95% 이상의 부분방전펄스가 분포하였다. 압력에 따른 영향없이 모두 동일한 양상을 보였으며, 전체 펄스 수 대비 정·부극성의 비를 표 4.21에 나타내었다. 펄스 수는 적게는 70개에서 최대 500개 정도가 발생하였다. 펄스 수는 N<sub>2</sub> 혼합비율이 클수록 많았다.



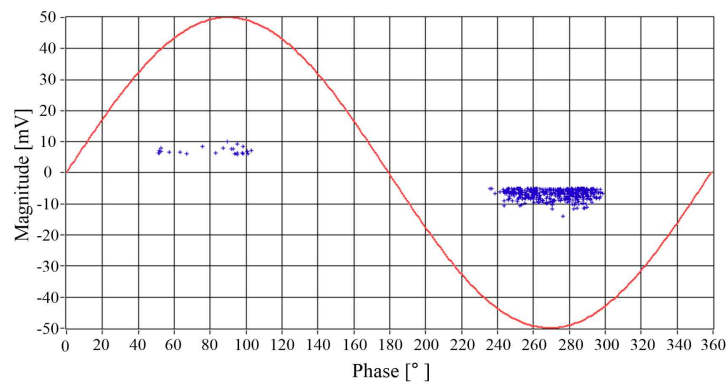
(a)  $\text{SF}_6$  100%



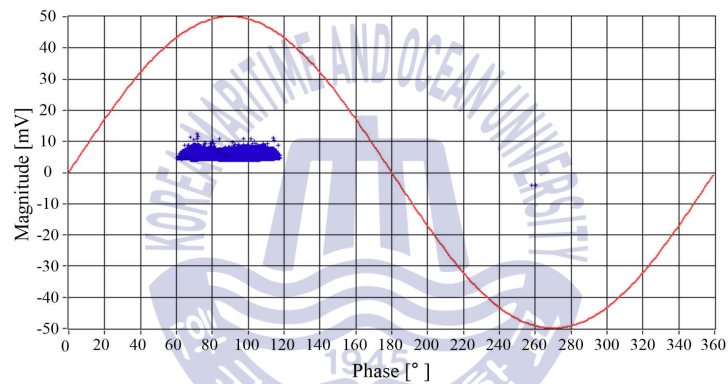
(b)  $\text{SF}_6$  80% -  $\text{N}_2$  20%



(c)  $\text{SF}_6$  50% -  $\text{N}_2$  50%



(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%

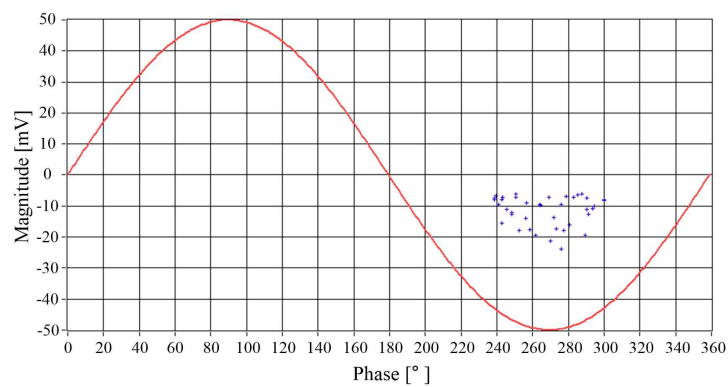


(e) N<sub>2</sub> 100%

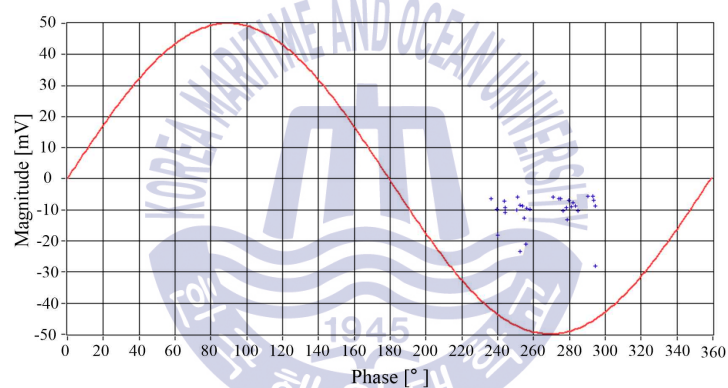
그림 4.27 위상분포(0.4 MPa)

Fig. 4.27 Phase distribution(at 0.4 MPa)

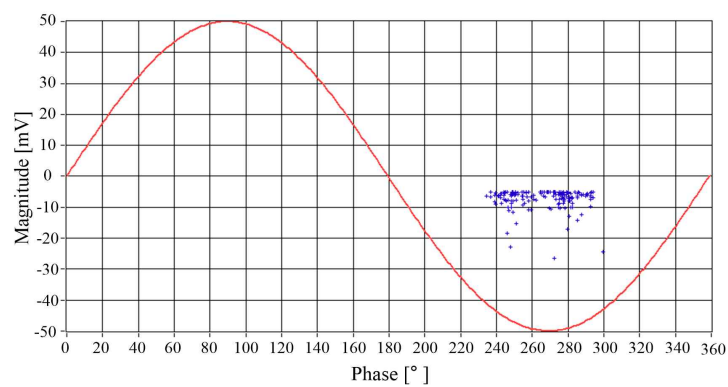




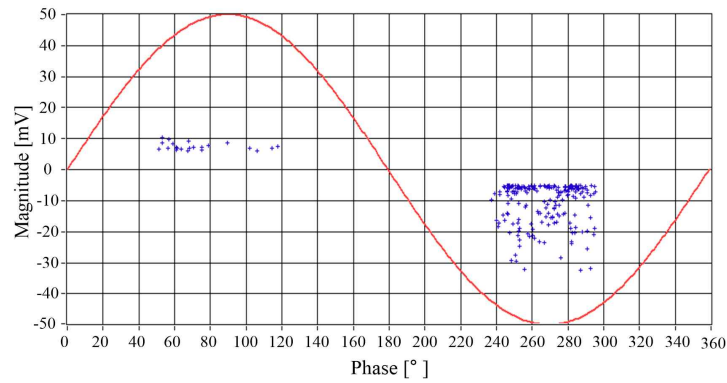
(a) SF<sub>6</sub> 100%



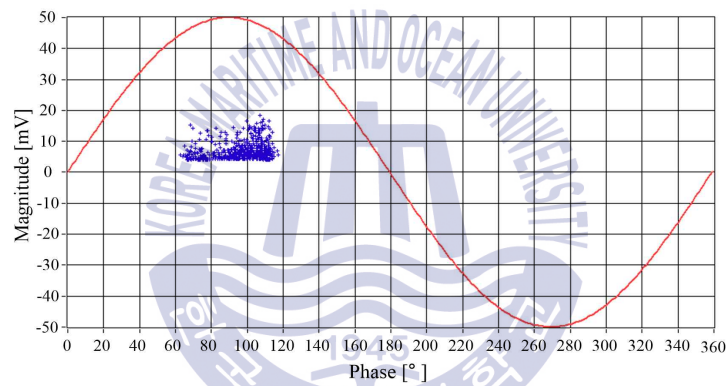
(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%



(c) SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%



(d) SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%



(e) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.28 위상분포(0.5 MPa)

Fig. 4.28 Phase distribution(at 0.5 MPa)

표 4.21 극성비(at DIV)

Table 4.21 Polarity ratio(at DIV)

구 분		SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	정극성	0.02	0.01	0.02	0.05	0.95
	부극성	0.98	0.99	0.98	0.95	0.05
0.5 MPa	정극성	0	0.01	0.01	0.04	0.99
	부극성	1	0.99	0.99	0.96	0.01

② 방전개시전압×1.25

방전개시전압×1.25배에서 최대 및 평균 펄스크기는 다음 그림 4.29 및 그림 4.30과 같다. SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%와 SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서는 절연파괴가 발생하였으며, N<sub>2</sub> 100%일 때 압력에 따른 증가율이 가장 크게 나타났다.

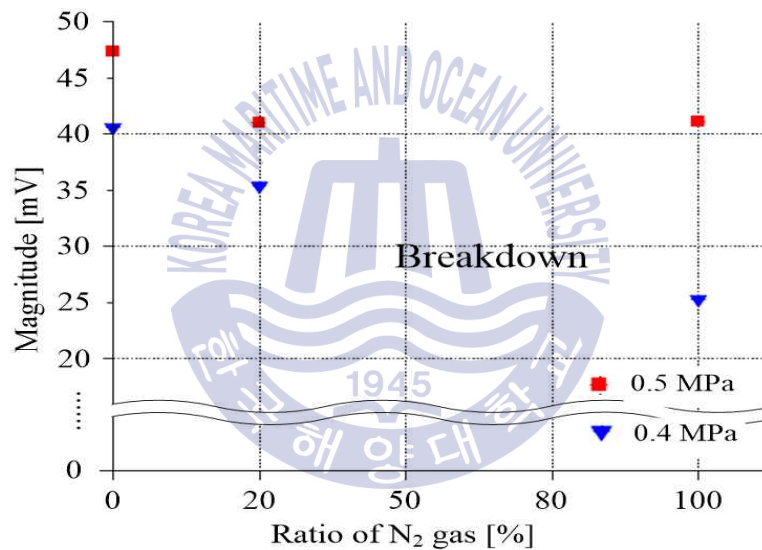


그림 4.29 최대펄스의 크기(at DIV×1.25)

Fig. 4.29 Maximum pulse magnitude(at DIV×1.25)

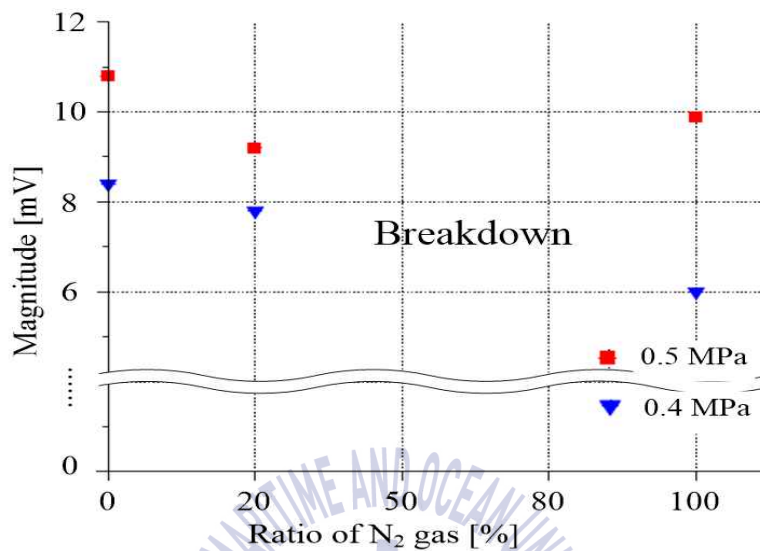


그림 4.30 평균펄스의 크기(at DIV×1.25)

Fig. 4.30 Average pulse magnitude(at DIV×1.25)

표 4.22와 표 4.23은 최대 및 평균 펄스 크기를 정리한 것으로, SF<sub>6</sub> 100%가 가장 높게 나타났다. 0.4 MPa일 때, SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%와 N<sub>2</sub> 100%에서 각각 SF<sub>6</sub> 100% 대비 최대펄스 크기가 13%, 38% 감소하였다. SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%와 SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%의 경우 절연이 파괴되기 전 최대펄스 크기가 100 mV를 넘었다. 압력이 높아짐에 따라 최대펄스 크기는 N<sub>2</sub> 100%에서 0.4 MPa 대비 62%로 가장 큰 증가율을 보였으며, 그 크기가 SF<sub>6</sub> 100%와 거의 동일하였다.

평균펄스 크기는 방전개시전압에 비해 SF<sub>6</sub> 100%는 감소, SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%는 증가하였으며 N<sub>2</sub> 100%는 0.4 MPa에서는 감소, 0.5 MPa에서는 증가하는 경향을 보였다. 평균펄스 크기도 SF<sub>6</sub> 100%일 때가 가장 크게 나타났다.

표 4.22 최대펄스의 크기(at DIV×1.25)

Table 4.22 Maximum pulse magnitude(at DIV×1.25)

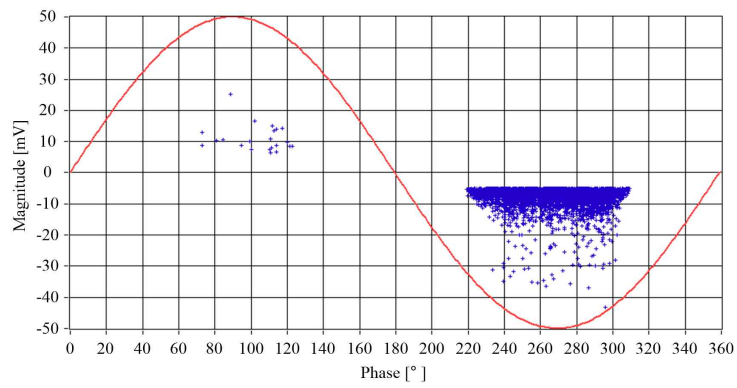
구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	40.6 mV	35.4 mV	-	-	25.3 mV
0.5 MPa	47.4 mV	41.0 mV	-	-	41.1 mV

표 4.23 평균펄스의 크기(at DIV×1.25)

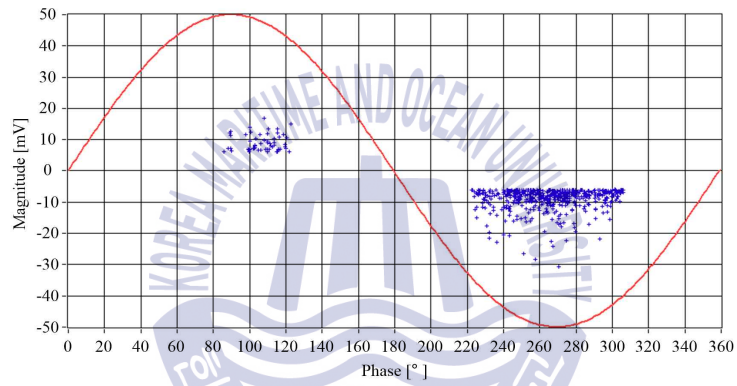
Table 4.23 Average pulse magnitude(at DIV×1.25)

구 분	SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	8.4 mV	7.8 mV	-	-	6.0 mV
0.5 MPa	10.8 mV	9.2 mV	-	-	9.9 mV

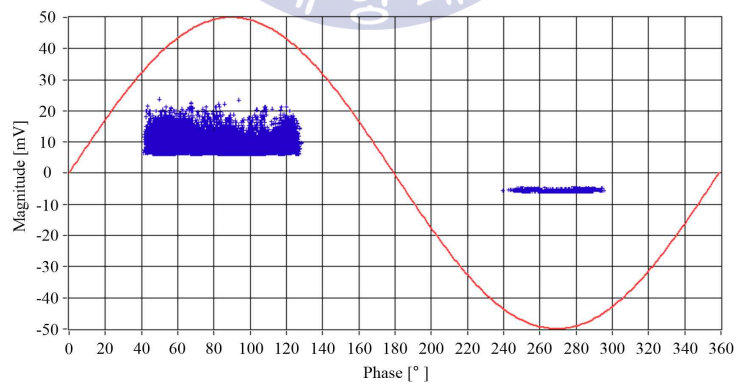
그림 4.31 및 그림 4.32는 방전개시전압에서 1.25배 증가시켜 부분방전의 위상을 측정한 것이다. 방전개시전압과 동일한 경향으로, N<sub>2</sub> 100%를 제외하고 0.4 MPa, 0.5 MPa 모두 220°~300°의 부극성에서 부분방전펄스의 90% 이상이 발생하였으며, N<sub>2</sub> 100%는 40°~130°에서 전체 펄스의 90% 이상이 분포하였다. 그러나 SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서는 절연내력을 이기지 못하고 절연이 파괴되었다. 펄스 수는 SF<sub>6</sub> 100%에서 200개 정도에 불과하였으나 N<sub>2</sub>의 함량이 높아질수록 6,000개, 7,000개로 30배 이상 증가하였으며, N<sub>2</sub> 100%에서는 190,000개까지 측정되었다. 절연파괴가 발생하기 전 SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50%, SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서는 펄스 수가 최대 80,000개까지 발생하였다.



(a) SF<sub>6</sub> 100%



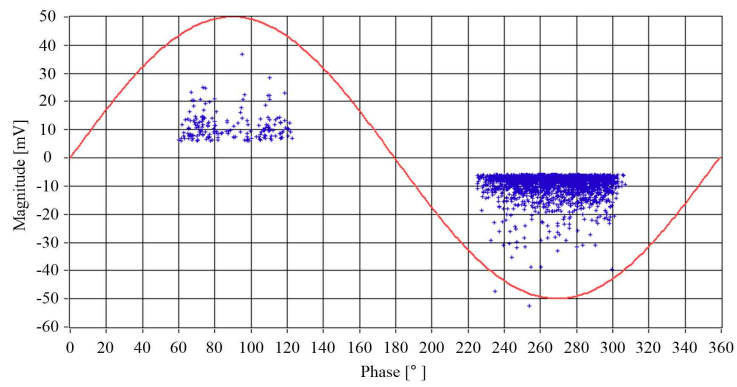
(b) SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%



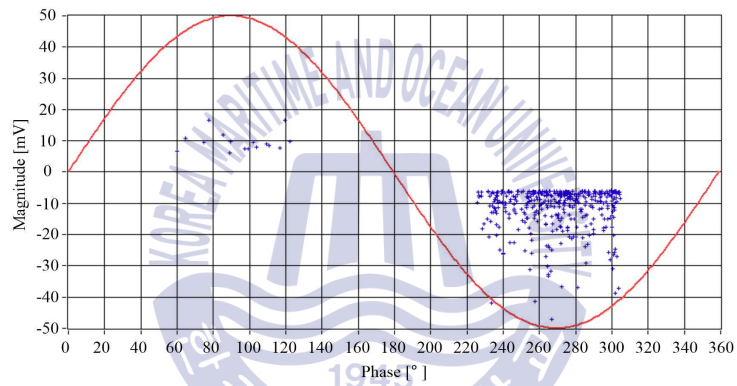
(c) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.31 위상분포(0.4 MPa)

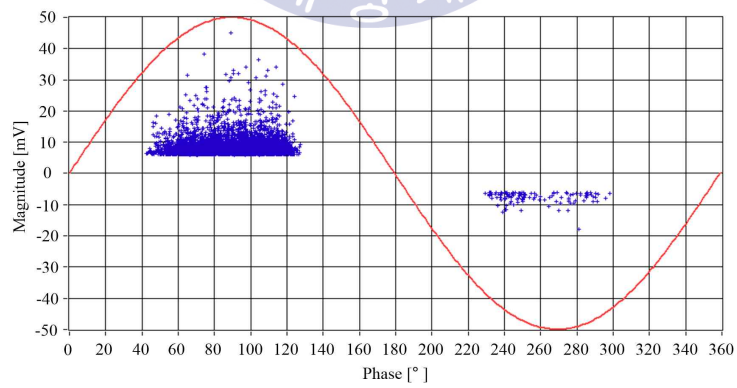
Fig. 4.31 Phase distribution(at 0.4 MPa)



(a) SF<sub>6</sub> 100%



(b) SF<sub>6</sub> 80%–N<sub>2</sub> 20%



(c) N<sub>2</sub> 100%

그림 4.32 위상분포(0.5 MPa)

Fig. 4.32 Phase distribution(at 0.5 MPa)

표 4.24 극성비(at DIV×1.25)

Table 4.24 Polarity ratio(at DIV×1.25)

구 분		SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	정극성	0.02	0.04	Breakdown		0.95
	부극성	0.98	0.96			0.05
0.5 MPa	정극성	0.03	0.09			0.92
	부극성	0.97	0.91			0.08





### 4.3 결과 고찰

실험 결과를 바탕으로 세 가지 결함에서 모두 절연성능을 만족하면서 SF<sub>6</sub>를 감소시킬 수 있는 혼합비율을 분석하였다.

도전성 이물질의 경우 방전 개시 및 소멸 전압, 펄스 크기 및 수, 위상 분포 및 극성비에 있어 가스 혼합비율에 따른 영향보다는 파티클의 움직임에 의존하였다. 가압된 가스절연개폐장치의 외함에 접촉된 이물질은 유도표면전하를 얻게 되고, 이 표면전하가 전계에 가해지면서 쿨롱힘(Coulomb force)이 생성된다. 이것이 중력보다 높아지면 도전성 이물질은 공중으로 날아오르게 되고, 전극 방향으로 가속화된다. 이러한 도전성 이물질의 움직임은 다음의 식 4.1과 같이 나타내어 질 수 있다.

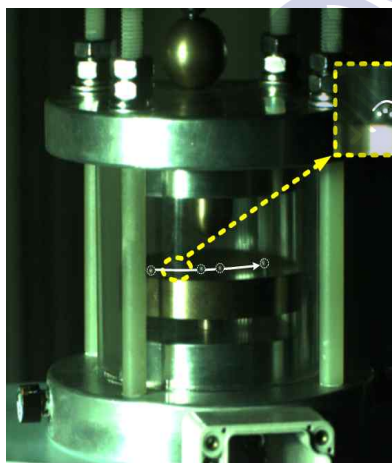
$$m\vec{a} + \vec{F}_{Coulomb} + \vec{F}_{Drag} + \vec{F}_{Grav} = 0 \quad (4.1)$$

전압이 가해지면 이물질은 움직이게 되는데 이때, 저압(부상전압)과 고압(부상전압의 두 배 이상)에서 각각 다른 움직임을 보인다. 저압에서는 이물질의 움직임이 다음의 세 단계로 나타난다.

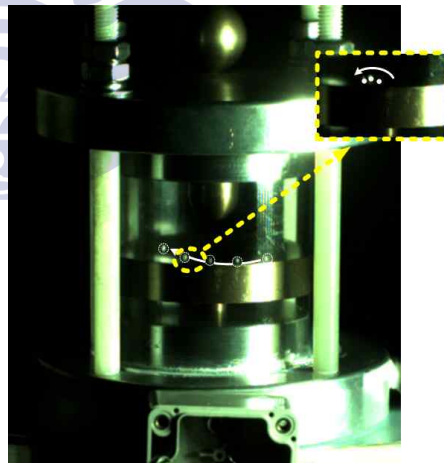
- Shuffling particle : 이물질의 움직임이 거의 없으며, 방전크기는 배경잡음(노이즈)과 비슷하다.
- Moving particle : 이물질이 움직이기 시작하며, 방전크기가 커진다.
- Jumping particle : 이물질이 수직으로 뛰며, 공중에서 움직이기도 한다. 방전크기가 매우 크다.

이러한 현상은 AC에서만 관측가능하다.

앞서 언급하였듯이 도전성 이물질의 경우 파티클의 움직임에 영향을 받기 때문에 이를 분석하는 것이 중요하다. 그림 4.33에서는 대표적으로 0.5 MPa일 때, 최대펄스크기의 최댓값과 최솟값이 나타난  $N_2$  100% 및  $SF_6$  80%- $N_2$  20%에서 파티클의 움직임을 분석하였다.  $N_2$  100%에서는 파티클이 수직으로 점핑하면서 이동하였으며, 한번 점핑할 때의 보폭이 매우 작았다. 전체 이동거리가 길며, 도체주위를 배회하거나 제자리에서 5~6회 점핑하다가 다시 전극계 내부를 운동하였다.  $SF_6$  80%- $N_2$  20%는 도체와 멀리 떨어진 전극계 가장자리를 따라 이동하였으며,  $N_2$  100%과 마찬가지로 수직으로 점핑하였다. 한번 점핑하여 이동할 때의 보폭이 매우 크고, 수직으로 점핑하는 높이가  $N_2$  100%에 비해 높지 않았다. 그러나 도체와 가까운 위치에서 이동할수록 점핑높이가 높고 펄스크기가 크게 나타났다.



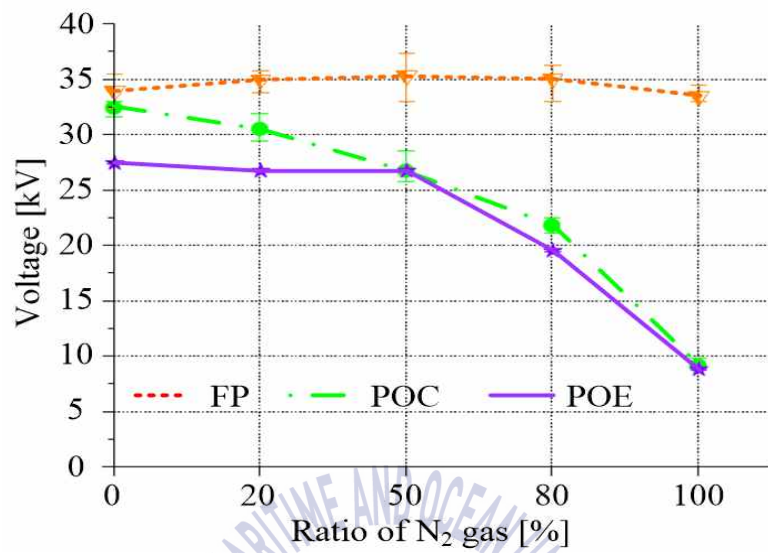
(a)  $N_2$  100%(0.5 MPa)



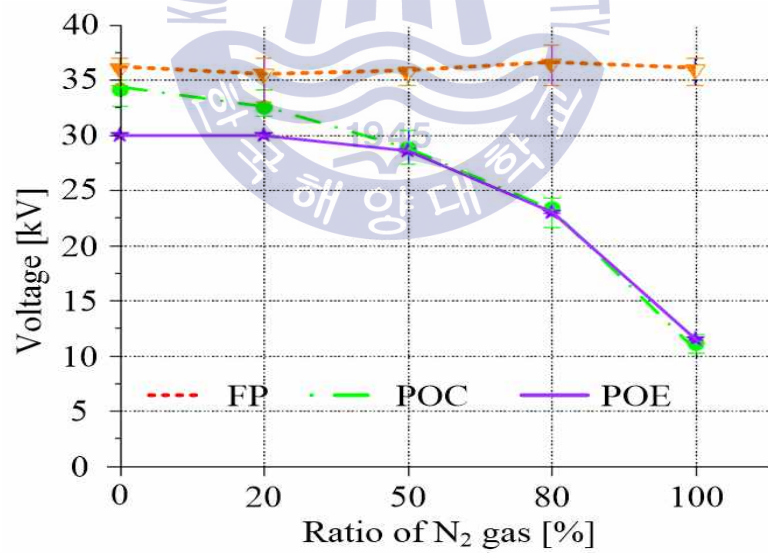
(b)  $SF_6$  80%- $N_2$  20%(0.5 MPa)

그림 4.33 이물질의 움직임  
Fig. 4.33 Motion of particle

각 결함에서의 방전 개시 및 소멸 전압을 그림 4.34와 그림 4.35에 나타내었다. 도전성 이물질의 경우 모든 혼합비율에서 방전 개시전압 및 소멸 전압이 동일하였으며, 외함 돌출은  $N_2$ 의 비율이 50% 이하일 때에는 방전 개시전압과 소멸전압이  $SF_6$  100%일 때와 동일하지만  $N_2$ 의 비율이 80% 이상이 되면 급격히 감소한다. 도전성 이물질과 외함 돌출에 있어 방전 개시전압 및 소멸전압의 경우  $N_2$ 의 비율이 50%이하일 때에는  $SF_6$  100%와 동일하기 때문에 문제가 없으나 앞선 결과에서 알 수 있듯이 외함 돌출의 경우  $SF_6$  50%- $N_2$  50% 및  $SF_6$  20%- $N_2$  80%에서 절연이 파괴되었기 때문에 적용이 불가능할 것으로 본다. 또한  $N_2$  100%는 방전 개시전압 및 소멸전압이  $SF_6$  100% 대비 60% 이상의 감소율로 절연성능을 만족시키지 못할 것으로 본다. 반면  $SF_6$  80%- $N_2$  20%는 도전성 이물질과 외함 돌출에서는  $SF_6$  100%와 동일한 전압에서 방전이 개시, 소멸하지만 도체 돌출에서는 감소하는 경향이였다. 이때의 감소율은 방전개시전압에서 6% 미만, 방전소멸전압에서는 13%이다. 절연파괴와 관련된 것은 방전개시전압으로, 감소량이 전압변동률 내 범위이며, 절연설계 시에 도체 돌출에 대한 문제가 고려되어진다면  $SF_6$ 와 동일한 절연을 유지하면서 사용량은 감소시킬 수 있을 것으로 본다.



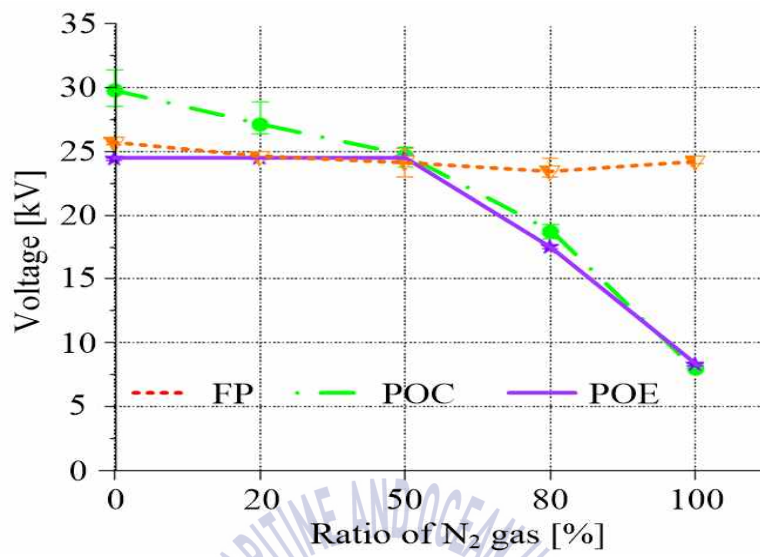
(a) 0.4 MPa



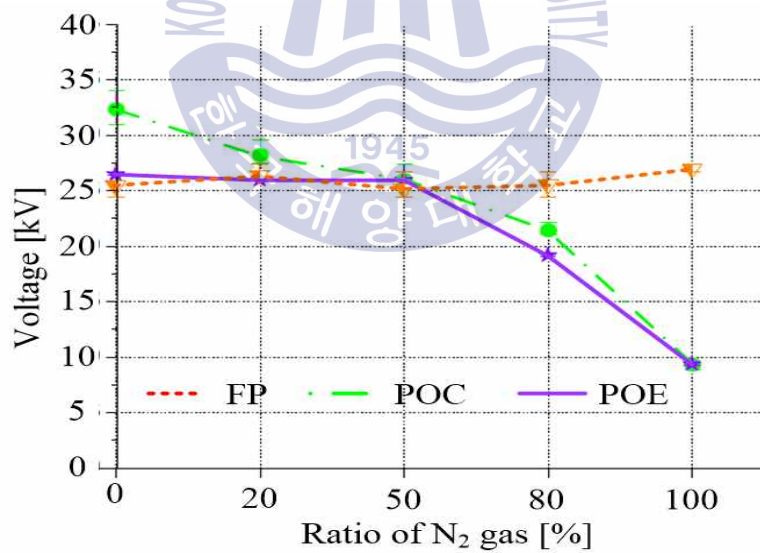
(b) 0.5 MPa

그림 4.34 방전개시전압

Fig. 4.34 Discharge inception voltage



(a) 0.4 MPa



(b) 0.5 MPa

그림 4.35 방전소멸전압

Fig. 4.35 Discharge extinction voltage

다음은 결함별 최대펄스크기를 분석한 것이다. SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%의 경우 외함 돌출에서 DIV는 SF<sub>6</sub> 100%와 동일하였지만 최대펄스크기는 감소하였으며, 도체 돌출에서도 SF<sub>6</sub> 100% 대비 최대펄스크기가 감소하였다. 그러나 도전성 이물질의 경우 0.4 MPa, DIV×1.25에서 최대펄스크기가 약 11% 정도 증가하였다.

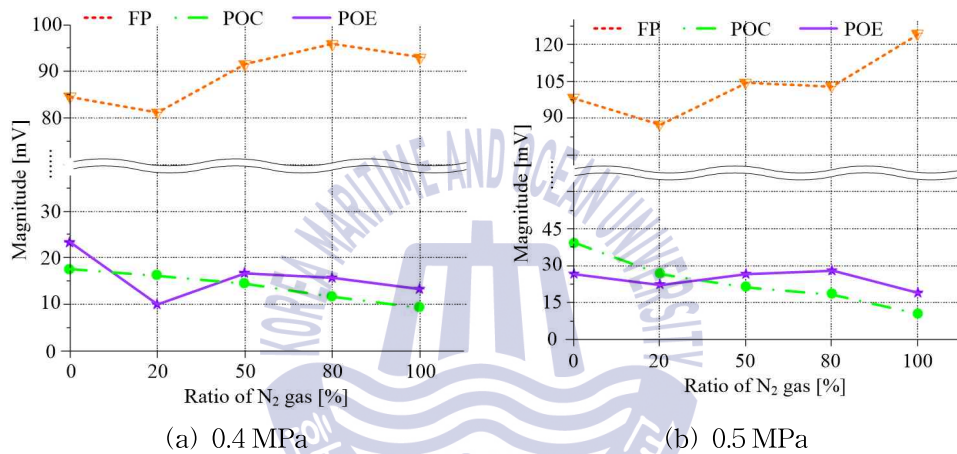


그림 4.36 최대펄스의 크기(at DIV)  
Fig. 4.36 Maximum pulse magnitude(at DIV)

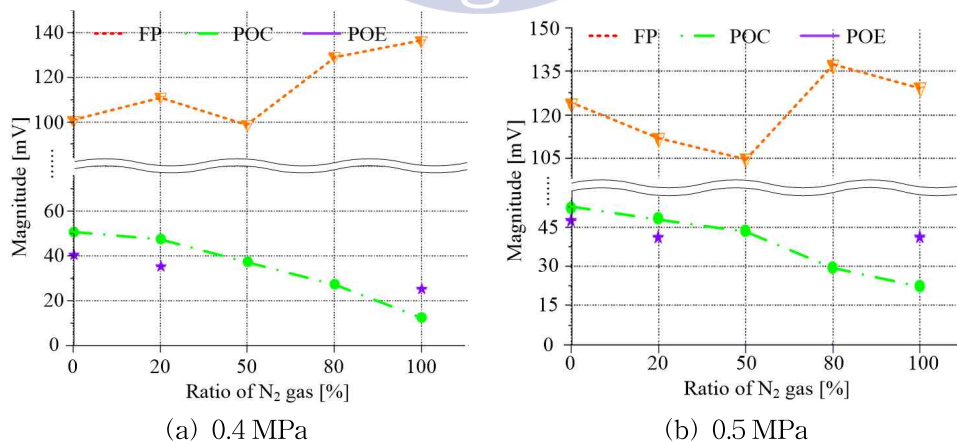


그림 4.37 최대펄스의 크기(at DIV×1.25)  
Fig. 4.37 Maximum pulse magnitude(at DIV×1.25)



결합별 평균펄스크기를 그림 4.38과 그림 4.39에 나타내었다. 도체 돌출 및 외함 돌출에서는 SF<sub>6</sub> 100% 대비 SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%일 때에 크기가 감소하였으나, 도전성 이물질의 경우 0.4 MPa, DIV에서 약 8% 가량 증가하였다.

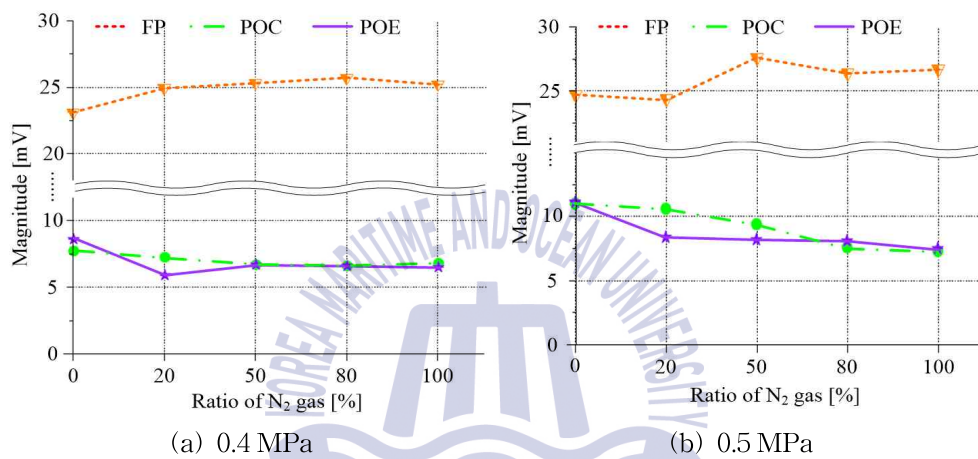


그림 4.38 평균펄스의 크기(at DIV)

Fig. 4.38 Average pulse magnitude(at DIV)

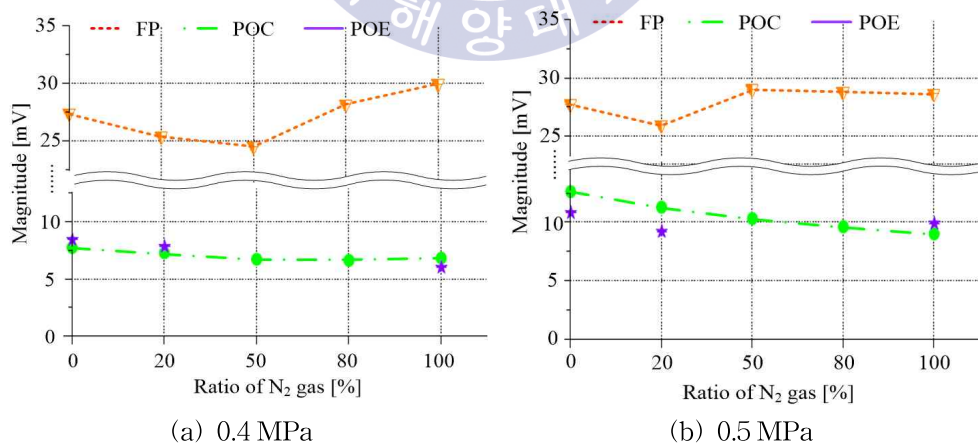


그림 4.39 평균펄스의 크기(at DIV×1.25)

Fig. 4.39 Average pulse magnitude(at DIV×1.25)

표 4.25와 표 4.26에 각각의 가스 혼합비율에서 발생한 펄스 수를 정리하였다. SF<sub>6</sub>의 경우 대표적인 부성기체로 전자가 SF<sub>6</sub> 분자에 부착되어 음이온을 만든다. 음이온은 전자보다 질량이 크기 때문에 전계에 의해 가속되더라도 전리에너지에 도달하기 힘들게 되고 그로 인해 전자사태의 발생 확률이 낮아진다. 부성기체의 성질은 기체의 절연내력을 향상시키기 때문에 다른 기체와 혼합하거나 단독으로 하여 절연기체로 사용한다. N<sub>2</sub>는 부성기체가 아니기 때문에 SF<sub>6</sub>에 비해 전자사태가 발생할 확률이 높으며, 이로 인해 많은 수의 펄스가 발생하게 된다.

표 4.25 펄스 수(at DIV)

Table 4.25 Pulse count(at DIV)

구 분		SF <sub>6</sub> 100%	SF <sub>6</sub> 80%- N <sub>2</sub> 20%	SF <sub>6</sub> 50%- N <sub>2</sub> 50%	SF <sub>6</sub> 20%- N <sub>2</sub> 80%	N <sub>2</sub> 100%
0.4 MPa	FP	80	80	80	80	80
	POC	200	200	200	200	200
	POE	70	70	70	500	19,000
0.5 MPa	FP	80	80	80	80	80
	POC	400	400	400	400	1,500
	POE	70	70	70	70	11,000

N<sub>2</sub>의 비율이 증가함에 따라 펄스 수가 많아진 것은 이러한 이유이며, N<sub>2</sub>에서 최대 펄스 수가 발생한 것이다. 도전성 이물질의 경우 파티클의 움직임으로 인하여 가스비율에 대한 영향이 적으며, 펄스 수의 차이가 크지 않다.

전자의 이동은 전계에 의해 가속되기 때문에 전압이 높아질수록 전자의



이동속도가 고속이 된다. 방전개시전압에서는  $N_2$  100%를 제외하고,  $SF_6$ 의 비율이 20% 이상에서는 펄스 수가 거의 동일하지만  $DIV \times 1.25$ 에서는  $N_2$ 의 비율이 증가함에 따라 펄스 수가 증가한다. 도전성 이물질과 도체 돌출은  $SF_6$  80%- $N_2$  20%에서의 펄스 수가  $SF_6$  100%와 동일하여 문제가 되지 않지만, 외함 돌출에서는 5~7배 가량 많이 발생하였기 때문에 향후 절연 진단 시에 고려되어야 한다.

표 4.26 펄스 수(at  $DIV \times 1.25$ )

Table 4.26 Pulse count(at  $DIV \times 1.25$ )

구 분		$SF_6$ 100%	$SF_6$ 80%- $N_2$ 20%	$SF_6$ 50%- $N_2$ 50%	$SF_6$ 20%- $N_2$ 80%	$N_2$ 100%
0.4 MPa	FP	80	80	80	80	80
	POC	2,500	2,500	7,000	20,000	7,000
	POE	1,000	7,000	Breakdown		100,000
0.5 MPa	FP	80	80	80	80	100
	POC	5,000	5,000	8,000	8,000	14,000
	POE	500	2,400	Breakdown		190,000

측정 결과로부터  $SF_6$  100% 대체로 가장 적합한 혼합비는  $SF_6$  80%- $N_2$  20%임을 확인하였다. 다만 절연파괴와 관련된 파라미터는 방전개시전압으로 도체 돌출에서의 방전개시전압이 6% 가량 감소하였지만 이는 전압 변동률 범위 내에 속하며, 절연설계 단계에서 이 부분에 대해 고려되어 진단면 충분히 대체 가능할 것으로 본다.

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 가스절연개폐장치의 절연매체인  $\text{SF}_6$ 의 사용량 감소를 위해 절연설계 및 위험도 관점에서  $\text{SF}_6$  혼합가스에서의 부분방전 특성에 대해 연구하였다.

부분방전을 모의하기 위하여 가스절연개폐장치 내부에 발생하는 주요 결합인 도전성 이물질(FP), 도체 돌출(POC) 및 외함 돌출(POE)의 결합 전극계를 제작하였다.  $\text{SF}_6$ - $\text{N}_2$  혼합가스( $\text{SF}_6$  100%,  $\text{SF}_6$  80%- $\text{N}_2$  20%,  $\text{SF}_6$  50%- $\text{N}_2$  50%,  $\text{SF}_6$  20%- $\text{N}_2$  80% 및  $\text{N}_2$  100%) 중에서 IEC 60270에 따라 최초의 절연파괴가 진행되는 방전 개시(DIV) 및 소멸 전압(DEV), 이 때의 펄스크기( $q$ ), 펄스 수( $n$ ), 위상분포( $\Phi$ ) 및 극성비를 분석하였다.

도전성 이물질은 혼합 가스비율보다는 파티클의 위치 및 움직임에 영향을 받는 방전 개시 및 소멸 전압은 모든 혼합비에서 변화가 6% 미만으로 나타났다. 위상분포도 혼합비의 영향보다는 파티클의 움직임에 의존하여, 전 위상에 걸쳐 발생하였으며, 도체주변을 배회하거나 높이 점핑할수록 펄스크기가 증가하였다.

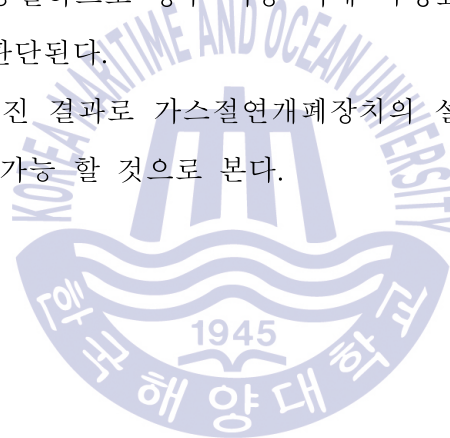
도체 돌출은  $\text{N}_2$ 의 비율이 증가함에 따라 방전 개시 및 소멸 전압, 최대 및 평균 펄스크기가 감소하였다. 펄스 수는 대체로  $\text{SF}_6$ 의 비율이 감소함에 따라 증가하였다. 위상분포는 방전개시전압에서는  $\text{N}_2$  100%일 때 전체 펄스의 95% 이상이 부극성에서,  $\text{SF}_6$ 가 20% 이상에서는 정극성에서 분포하였다. 그러나  $\text{DIV} \times 1.25$ 일 때는 모든 혼합비에서 전체 펄스의 90% 이상이 정극성에 분포하였다.

외함 돌출의 경우,  $\text{N}_2$ 의 비율이 50% 이하일 때는  $\text{SF}_6$  100%와 동일한 전압에서 방전이 개시 및 소멸하였으며, 80% 이상이 되면서 급격하게 감

소하였다. 또한 SF<sub>6</sub> 50%-N<sub>2</sub> 50% 및 SF<sub>6</sub> 20%-N<sub>2</sub> 80%에서 절연 파괴가 나타나 가스절연개폐장치에서 요구되는 절연 성능은 충족할 수 없다고 판단된다. SF<sub>6</sub>의 비율이 감소함에 따라 펄스 수가 증가하였으며, 위상분포는 N<sub>2</sub> 100%에서 전체 펄스의 90% 이상이 정극성, SF<sub>6</sub>가 20% 이상에서는 부극성에서 분포하였다.

상기의 결과로부터, SF<sub>6</sub> 80%-N<sub>2</sub> 20%의 경우 도체 돌출에서 방전개시전압이 감소하였으나, 이 때의 감소율은 6% 미만으로 절연을 유지하면서 SF<sub>6</sub>의 사용량을 감소시킬 수 있을 것으로 본다. 모든 결함에 있어 SF<sub>6</sub> 100%와 극성비가 동일하므로 향후 적용 시에 극성효과는 무시되어도 문제가 없을 것으로 판단된다.

본 논문에서 얻어진 결과로 가스절연개폐장치의 설계와 운용적 측면에서 진단기술에 활용가능 할 것으로 본다.



## 참 고 문 헌

- [1] Shigemitsu Okabe, Junichi Wada and Genyo Ueta, August 2015, "Dielectric Properties of Gas Mixtures with  $C_3F_8/C_2F_6$  and  $N_2/CO_2$ ", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22(4), pp.2108-2116.
- [2] 에너지경제연구원(2014), "2014 에너지통계 연보".
- [3] 온실가스종합정보센터, "국가 온실가스 통계 총괄관리계획(2015~2019)".
- [4] Hyang-Eun Jo, Sun-Jae Kim, Gi-Woo Jeong, Gyung-Suk Kil and Young-Min Kim, September 21-25, 2014, "Comparison of Partial Discharge Pattern in  $SF_6$  and  $N_2$  Gas", International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2014, pp.569-572.
- [5] N. Hayakawa I, Y. Sugimori and H. Okubo, June 5-9, 2005, "Partial Discharge Current Pulse Waveform Analysis (PD-CPWA) Based on PD Mechanisms in Solid and Gas Media", Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.812-815.
- [6] Wang-Byuck Suh, Jae-Yun Yim, Ki-Dong Song, Yong-Moo Chang and Dong-Ho Bae, 2011, "Breakdown Voltage Characteristics in the  $SF_6/N_2$  Gas Mixtures for DS/ES Compartment of a 245kV Gas Insulated Switchgear", 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology, pp. 366-369.
- [7] Y. Yoshitake, N. Hayakawa, T. Ueda and H. Okubo, 2002, "Impulse Partial Discharge and Breakdown Mechanism under Non-uniform Electric Field in  $N_2SF_6$  Gas Mixtures", 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,

pp.793-796.

- [8] T. Yamada, T. Ishida, N. Hayakawa and H. Okubo, February 2001, "Partial Discharge and Breakdown Mechanisms in Ultra-dilute SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Gas Mixtures", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8(1), pp.137-142.
- [9] S.S. Tezcan, M.S. Dincer, H.R. Hiziroglu, 2006, "Prediction of breakdown voltages in N<sub>2</sub> + SF<sub>6</sub> gas mixtures", 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.222-225.
- [10] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, M. I. Qureshi, 1998, Electrical insulation in power systems, Taylor & Francis.
- [11] M. S. Naidu, V. Kamaraju, 2009, "High voltage engineering fourth edition", Tata McGraw-Hill.
- [12] 이복희, 2010, "高電壓大電流工學", 청문각.
- [13] 한국산업안전보건공단, 2010, "물질안전보건자료(품질명 : 질소)".
- [14] E. Gulski, 1995, "Digital Analysis of Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2(4), pp.822-837.
- [15] G. Stone, 2000, "Importance of Bandwidth in PD Measurement in Operating Motors and Generators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7(1), pp.6-11.
- [16] A. Krivda, 1995, "Automated Recognition of Partial Discharge", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2(5), pp.796-821.
- [17] 大韓電氣學會, "電氣設備의 診斷技術", 1994, pp.61-84.
- [18] Paul Gill, 2008, "Electrical power equipment maintenance and testing", Taylor & Francis, pp.1-6.

- [19] CIGRE Working group D1.03, 2013, "Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics".
- [20] F. H. Kreuger, 1989, "Partial discharge detection in high-voltage equipment", Butterworth, pp.1-14, pp.129~152.
- [21] N. Giao Trinh, 1981, "Short Notes on the Physics of Corona Discharge", IEEE/PES Special Course on Corona and Field Effects of High Voltage Transmission Lines.
- [22] 宅間 董・柳父 悟 執筆, 李福熙 譯, "高電壓大電流工學", 青文閣, 1982.
- [23] 정성계, 이덕출, 1982, "고전압 공학", 문운당.
- [24] S. M. Strachan, S. Rudd, S. D. J. McArthur, M. D. Judd, S. Meijer, E. Gulski, February 2008, "Knowledgebased diagnosis of partial discharges in power transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 15(1), pp.259~268.
- [25] 송재용, 서황동, 길경석, 한문섭, 장동욱, 2005. 5, "고압 CV케이블에 서의 부분방전측정과 위치검출에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, p. 190.
- [26] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, and T. Strehl, December 2008, "Sensitivity of UHF PD measurements in power transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15(6), pp.1553~1558.
- [27] C. S. Chang, J. Jin, S. Kumar, Q. Su, T. Hoshino, M. Hanai, and N. Kobayashi, 2005, "Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain", Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Measure. Techn., Vol. 152(3), pp.129~140.
- [28] H. R. Mirzaei, A. Akbari, E. Gockenbach and K. Miralikhani, February 2015, "Advancing new techniques for UHF PD detection and localization in the power transformers in the factory tests",

- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22(1), pp.448~455.
- [29] P. J. Harrop, 1972, "Dielectrics", Butterworths, London.
- [30] H. Kawada, M. Honda, T. inoue, and T. Amemiya, 1984, "Partial discharges automatic monitor for oil-filled power transformer", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103(2).
- [31] R. T. Harrold, 1980, "Acoustic emission signatures of arcs and sparks", IEEE International Symposium on Electrical Insulation.
- [32] T. Bengtsson M. Leijon, L. Ming and B. Jonsson, 1995, "Directivity of acoustic signals from partial discharge in Oil", IEE proceeding-Science, Measurement and Technology, Vol. 142(1), pp.85-88.
- [33] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, 2003, "Advanced PD Inference in on-Field Measurements, Part I. Noise Rejection", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 10(2), pp.216-224.
- [34] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, G. Pasini, F. Puletti, "Advanced PD inference in on-field measurements. Part II. Identification of defects in solid insulation systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 10(3), pp.528-538, 2003.
- [35] A. Cavallini, G. C. Montanari, D. Fabiani, L. Testa, 2009, "Advanced technique for partial discharge detection and analysis in power cables", Int conf. on condition Monitoring & Diagnostic Engineering Management of Power Station/Substation Equipment, pp.1-4.
- [36] Herman H. Sinaga, B.T. Phung, Trevor R. Blackburn, 2014,

- “Recognition of single and multiple partial discharge sources in transformers based on ultra-high frequency signals”, The Institution of Engineering and Technology, Vol. 8(1), pp. 160 - 169.
- [37] 김우철, 김재주, 박병욱, 박성현, 박태성, 송문섭, 이상열, 이영조, 전종우, 조신섭, 2003, “제4개정판 통계학 개론”, 영지문화사.
- [38] Lapp, A., Kranz, H.-G, 2000, “The use of the CIGRE data format for PD diagnosis applications”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7(1), pp.102-112.
- [39] R. Bozzo, L. Centurioni, F. Guastavino, 1993, “Measuring the Endurance of Films in Partial Discharges”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28(6), pp.1050-1056.
- [40] 정동훈, 우수열, 서경보, 김진호, 2011, “혼합가스의 이물 존재시 절연 특성 연구”, 2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1262-1263.
- [41] Peter H.F. Morshuis, 2013, “Partial discharge analysis in HVDC gas insulated substations”, pp.103-112.



## 연구논문 발표실적

### ◎ 국제전문학술지

- (1) "Positioning of Partial Discharge Origin by Acoustic Signal Detection in Insulation Oil", Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 2, No. 1, pp.28~31, 2012. 1.(SCIE)
- (2) "Characteristic Analysis and Origin Positioning of Acoustic Signals Produced by Partial Discharges in Insulation Oil, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 8, No.6, pp.1468~1473, 2013. 10.(SCIE)
- (3) "Comparison of Partial Discharge Characteristics in SF<sub>6</sub> Gas under AC and DC", TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 16, No. 5, Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, December 25, 2015.(SCOPUS)
- (4) "Identification of Defect Types by Analysis of PD Pulses in SF<sub>6</sub> Gas", International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 10 No. 19, pp.40703~40708, 2015.(SCOPUS)
- (5) "Measurement and Analysis of Partial Discharges in SF<sub>6</sub> Gas under HVDC", MEASUREMENT. 2016.(SCI) - 심사 중
- (6) "Partial Discharge Characteristics in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixture Gases Under HVDC", Science of Advanced Materials, 2016. 1.(SCIE) - 심사 중

### ◎ 국내전문학술지

- (1) "코로나와 직렬아크 방전에 의해 발생한 음향신호의 분석", 한국전기전자재료학회논문지, 제25권, 제2호, pp.147~152, 2012. 2.

- (2) “절연유중 부분방전 검출을 위한 안테나의 최적 설계”, 한국전기전자재료학회논문지, 제26권, 제4호, pp.309~314, 2013. 4.
- (3) “SF<sub>6</sub> 가스 중 직류고전압하에서 부분방전 특성”, 한국전기전자재료학회논문지, 제27권 4호, pp.238~243, 2014. 1.
- (4) “SF<sub>6</sub> 압력에 따른 결함별 부분 방전 펄스의 분포 분석”, 한국전기전자재료학회 논문지, 제28권, 제1호, pp.40~45, 2015. 1.
- (5) “가스절연구조에서 단일 부분방전펄스 분석에 의한 결함 판별”, 한국전기전자재료학회 논문지, 제28권, 제5호, pp.320~325, 2015. 5.
- (6) “SF<sub>6</sub> 가스 중 HVDC에서 금속 파티클의 부분방전 특성”, 한국전기전자재료학회 논문지, 제28권, 제12호, pp.831~836, 2015. 12.
- (7) “SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 혼합가스 중 돌출부 결함의 부분방전 특성 분석”, 한국전기전자재료학회 논문지, 제29권, 제1호, pp.44~49, 2016. 1.



◎ 국제학술회의 발표

- (1) “Calibration Method of Partial Discharge Sensor in GIS”, Proceeding of 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Korea, pp. 2094~2097, Aug. 25~30, 2013.
- (2) “Characteristics of LED Bulbs at Ultra-low Temperature”, 20th The International Conference on Electrical Engineering(ICEE), pp.1910~1913, June 15~19, 2014.
- (3) “Characteristics of Partial Discharge depending on SF<sub>6</sub> Pressure in High Voltage Direct Current”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2014, pp.557~560, September 21~25, 2014.
- (4) “Comparison of PD Measurement by the IEC60270 and Acoustic Emission in a Pilot GIS Chamber”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2014, pp.565~568, September 21~25, 2014.
- (5) “Comparison of Partial Discharge Pattern in SF<sub>6</sub> and N<sub>2</sub> Gas”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2014, pp.569~572, September 21~25, 2014.
- (6) “Defects Identification Algorithm by Analysis of PD Pulses in SF<sub>6</sub> Gas”, 21th The International Conference on Electrical Engineering 2015, pp.398(1)~398(4), July 5~9, 2015.
- (7) “Comparison of Partial Discharge Pulse Waveforms Between AC and DC Voltage in SF<sub>6</sub> Gas”, 21th The International Conference on Electrical Engineering 2015, pp.401(1)~401(4), July 5~9, 2015.
- (8) “Analysis of DIV and DEV in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixture Gas”, 19th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.134(1)~134(4), August 23~28, 2015.

- (9) “Algorithm for Defects Identification by Analysis of PD Pulses in SF<sub>6</sub> Gas”, 19th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.165(1)~165(5), August 23~28, 2015.
- (10) “Partial Discharge Localization in Insulation Oil by Electrical-Acoustic Method”, 19th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.209(1)~209(4), August 23~28, 2015.
- (11) “Partial Discharge Characteristics in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixture Gases Under HVDC”, International Conference on Advanced Electromaterials, November 17~20, 2015.

#### ◎ 대학학술논문지

- (1) “선박용 LED 비상등의 설계 및 제작”, 2012년도 한국전기전자재료학회 전문연구회 합동 춘계학술대회 논문집, p.43, 2012.4.20.
- (2) “잠수함용 LED 등기구의 설계”, 2012년도 한국전기전자재료학회 전문연구회 합동 춘계학술대회 논문집, p.47, 2012.4.20.
- (3) “직류 및 교류 전기철도용 개폐보호시스템의 국제규격 분석”, 2012년도 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, p.160, 2012.6.27~6.29.
- (4) “선박용 LED 다운라이트의 제작과 평가”, 2012년도 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, p.277, 2012.6.27~6.29.
- (5) “초음파 검출에 의한 수배전반 진단”, 2012년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.KSR2012A214.1~2012A214.6, 2012.10.18~10.20.
- (6) “함정용 LED 탐조등 규격(안)”, 2012년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, p.290, 2012.10.18~10.20.
- (7) “함정용 LED 투광등 규격(안)”, 2012년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, p.291, 2012.10.18~10.20.
- (8) “함정용 LED 별브 규격(안)”, 2012년 한국마린엔지니어링학회 후기학

- 술대회 논문집, p.292, 2012.10.18~10.20.
- (9) “잠수함용 LED 등기구 국방규격(안)”, 2012년 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, p.294, 2012.10.18~10.20.
- (10) “출력 유연형 LED 투광등”, 2012년도 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, p.96, 2012.11.8~11.9.
- (11) “SF<sub>6</sub> 가스 중 절연 결함별 부분방전 패턴분석”, 2013년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.KSR2013S233.1~2013S233.6, 2013.5.23~5.25.
- (12) “부분방전패턴 분석을 통한 판별 파라미터”, 2013년도 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, p.318, 2013.6.19~6.21.
- (13) “LED 벌브의 내진동 대책”, 2013년 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, p.209, 2013.6.27~6.28.
- (14) “선박용 비상랜턴의 최적 파장에 관한 연구”, 2013년 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, p.212, 2013.6.27~6.28.
- (15) “LED조명의 해군함정 적용에 관한 연구”, 2013년 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, p.214, 2013.6.27~6.28.
- (16) “SF<sub>6</sub> 가스 중 결함별 부분방전의 PRPD 분석”, 2013년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.KSR2013A116.1~116.5, 2013.11.7~11.9.
- (17) “극저온에서 LED의 동작특성”, 2014년도 공동학술대회 한국마린엔지니어링학회, p.123, 2014.06.12~06.14.
- (18) “주·보조등 겸용 LED 잠수함등 등기구 개발”, 2014년도 후기학술대회 한국마린엔지니어링학회, p.122, 2014.10.23~10.25.
- (19) “양식용 LED 파장제어 시스템”, 2014년도 후기학술대회 한국마린엔지니어링학회, p.123, 2014.10.23~10.25.
- (20) “Parabolic 반사판을 적용한 LED 탐조등”, 2014년도 후기학술대회 한국마린엔지니어링학회, p.124, 2014.10.23~10.25.
- (21) “HVDC에서 SF<sub>6</sub> 가스 중 부분방전의 특성”, 2014년도 추계학술대회

한국전기전자재료학회, p.91, 2014.11.14.

(22) “SF<sub>6</sub> 가스 중 AC/DC에서 부분방전 특성 분석”, 2015년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp.KSR2015S306(1)~(5), 2015.05.21.~05.23.

(23) “철도차량용 피뢰기 단로장치의 설계 및 제작”, 2015년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp.KSR2015S307(1)~(5), 2015.05.21~05.23.

(24) “급전선로용 피뢰기의 열화표시장치”, 2015년도 한국철도학회 춘계학술대회, pp.KSR2015S308(1)~(5), 2015.05.21~05.23.



## 감사의 글

석·박사 6년, 돌아보면 정말 긴 시간이었습니다. 다른 학부에서 와서 모든 것이 새로웠던 2010년부터 지금까지 대학원생활, 누구나 그렇듯 졸업한다는 기쁨보다는 아쉬움이 앞섭니다. 모든 시간이 재미있고 즐겁지 않았습니 다. 힘든 일도 있고 도 망치고 싶은 순간도 있었습니다. 그러나 매순간 제 옆에는 지도교수님, 길경석 교수님께서 버팀목이 되어주셨기 때문에 이렇게 잘 마무리하고 졸업을 할 수 있었다고 생각합니다. 교수님의 가르침이 있었기에 제가 성장할 수 있었습니다. 교수님의 가르침을 바탕으로 사회에 나가서 부끄럽지 않은 제자가 되겠습니다. 감사하다는 말로는 부족할 정도로 감사드립니다.

바쁘신 와중에도 보다 알찬 논문이 되도록 심사해주신 김윤식 교수님, 장낙원 교수님, 서동환 교수님, 먼 길 마다하지 않으시고 많은 가르침을 주신 한국전기연구원 조한구 박사님께도 감사의 말씀을 전해 드립니다. 대학원 과정동안 많은 가르침을 주신 이성근 교수님과 주양익 교수님, 전태인 교수님 감사드립니다.

눈 뜬 시간의 95%를 함께 생활했던, 가족보다 오랜 시간을 함께 해온 고전압 연구실 식구들, 동고동락하며 즐거웠던 일, 힘들었던 일 많았습니다. 주말도 없이 아침부터 밤까지 12시간 넘게 학교에 남아 공부하는 풀타임, 주말마다 바쁜 시간 쪼개어 학교 오시는 파트타임 선배님들 48명, 한 분 한 분 감사의 말씀을 전할 분들이 많아 지면으로는 다 전하지 못할 거 같습니다. 직접 찾아뵙고 감사의 말씀을 전하겠습니다.

오랜만에 봐도 언제나 가족처럼 대해주는 우리 진동소음실험실 식구들, 다람쥐 쳇바퀴 도는 듯한 일상에서 일탈을 할 수 있도록 해준 폭식계, 마지막으로 좋은 논문 쓸 수 있도록 많은 지원을 아끼지 않은 효성 AMS 팀원들께도 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다. 자주 못 만나도 항상 먼저 연락해 주고 위로해 주는 친구들, 정말 고맙고, 이제는 자주 보자.

감사의 글을 쓰면서 제가 얼마나 많은 분들에게 도움을 받았는지, 얼마나 많은 분들께 감사해야 하는지 새삼 느끼게 되었습니다. 많은 선배님들, 후배님들, 동기, 친구들의 이름을 쓰고 빠진 분들이 없나 확인하고, 논문보다 어려웠습니다. 지면이 아닌 한 분 한 분 찾아뵙고 논문을 드리면서 감사의 인사를 전하겠습니다. 마지막으로 항상 저를 걱정하시고 기다려주시는 부모님께 이 논문을 바치며 감사의 글을 마치겠습니다. 감사합니다.

2015년 1월, 조항은 드림